

Das Lastpfad und Knotenmodell - Eine Erweiterung des C&C²-Ansatzes zur Bewertung von Ersatzgrößen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Sven Vogel, M.Sc.

aus Offenbach am Main

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. E. Kirchner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
Tag der Einreichung:	10.11.2020
Tag der mündlichen Prüfung:	23.02.2021

Darmstadt 2021

D17

Vogel, Sven:

Das Lastpfad und Knotenmodell - Eine Erweiterung des C&C²-Ansatzes zur Bewertung von Ersatzgrößen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2021

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-178841

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/17884>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von TUpriints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Nicht kommerziell – Share Alike 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente pmd der Technischen Universität Darmstadt. In den viereinhalb Jahren sind mir viele Menschen begegnet, die mich immer wieder unterstützt haben. Im Folgenden möchte ich ein paar mir wichtige Personen und Personengruppen herausstellen und namentlich danken.

Besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater und Leiter des Fachgebiets Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner für die Betreuung der Arbeit, für das entgegengebrachte Vertrauen und die gewährten Freiheiten bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen danke ich für die intensiven Gespräche und Anregungen, die mir geholfen haben, meine Arbeit präziser auszurichten und fachlich zu verbessern. Der intensive Austausch mit Ihnen und Ihrem Team hat meine Forschung bereichert.

Vielen Dank an alle Teilnehmer der ProbandInnenstudie. Besonders möchte ich hierbei Herrn Patric Grauberger danken. Der Austausch mit dir hat mir maßgeblich geholfen und meine Probandenstudie überhaupt erst möglich gemacht.

Dr.-Ing. Herrmann Kloberdanz danke ich für die vielen Gespräche und den Erfahrungsaustausch.

Für die schöne Zeit, die gute Aufnahme und die Zusammenarbeit am pmd danke ich meinen „alten“ Kollegen des AB ECO, den 666ern und den 805ern, ganz besonders natürlich meinem guten Freund und Kollegen Jean-Paul Beetz, der mich überzeugt hat, mich am pmd zu bewerben.

Meinen „neuen“ Kollegen danke ich ebenfalls für eine sehr schöne und abwechslungsreiche Zeit und dafür, dass sie mich zu jeder Zeit „ertragen“ haben. Besonders gilt der Dank Georg Martin, Stefan Schork, Tobias Schirra, Jan Wenzel und Gunnar Vorwerk-Handing und Jannik Reichwein. Die Zeit mit euch werde ich schmerzlich vermissen.

Auch der Gemeinschaftswerkstatt des iMS und des pmd möchte ich hier danken, besonders Jochen Ott und Volker Rosmann. Ihr habt immer alles möglich gemacht, auch wenn ich immer wieder spontan und dringend irgendwelche Bauteile benötigte.

Meiner Familie danke ich für die Ermöglichung meines Bildungsweges und die bedingungslose Unterstützung, gerade auch in den letzten Jahren in denen ich immer wieder von den Sinnfragen heimgesucht wurde. Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Anne, ohne deine Unterstützung, deine unermüdliche Ermunterungen und deiner Nachsicht mit mir würde es diese Arbeit nicht geben. Vielen Dank!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit.....	2
1.3	Gliederung der Arbeit	2
2	Stand der Forschung	4
2.1	Grundlagen Konstruktionsmethodik.....	4
2.1.1	Modelle und Methoden.....	4
2.1.2	Modellierung von Produkten und technischen Systemen	6
2.1.3	Produktentwicklungsprozess	16
2.2	Sensorintegrierende Maschinenelemente.....	19
2.3	Grundlagen für die Bewertung von Messsystemen.....	22
2.3.1	Messmodelle	22
2.3.2	Messunsicherheit.....	23
2.4	Interpretation des Standes der Forschung.....	24
3	Forschungsdesign	26
3.1	Forschungsbedarf.....	26
3.1.1	Die bestehenden Hilfsmittel für die Integration von Sensoren unterstützen nur bei der Auswahl von Sensoren, nicht aber bei der Auswahl von Ersatzgrößen.....	26
3.1.2	Die Hilfsmittel der Messtechnik zur Einschätzung von Mess- und Störgrößen zielen auf spätere Phasen der Entwicklung von Messsystemen ab.....	27
3.1.3	Es fehlt eine Modellbasis zur methodischen Identifikation und Auswahl von Ersatzgrößen.	28
3.2	Forschungsfragen.....	28
3.3	Forschungsvorgehen	29
4	Zentrale Modelle der Arbeit	30
4.1	Unterscheidung von Ziel-, Ersatz- und Messgröße	30
4.2	Erweiterung des C&C ² -Ansatzes für die Bestimmung von Ersatzgrößen.....	34
4.2.1	Identifikation von Messstellen und Ersatzgrößen	38
4.2.2	Identifikation der zu berücksichtigenden Parameter	40
4.2.3	Berücksichtigung von Störgrößen	43
4.2.4	Besonderheit bei parallelen Lastpfaden.....	45
4.2.5	Besonderheit bei Umformung und Wandlung innerhalb des Wirknetzes	51
4.3	Das Lastpfad- und Knotenmodell	55
4.3.1	Elemente des Modells und ihre Eigenschaften.....	56

4.3.2	Eigenschaften eines Lastpfad- und Knotenmodells	65
5	Evaluation des Lastpfad- und Knotenmodells an bekannten Produkten.....	67
5.1	Sensorische Erweiterung einer Industriescheibenbremse	67
5.1.1	Aktueller Stand und Aufgabenbeschreibung.....	67
5.1.2	Bilden des Lastpfad- und Knotenmodells.....	68
5.1.3	Analyse des Lastpfad- und Knotenmodells und Ableitung von Erkenntnissen	71
5.2	Prozessüberwachung in einer Flachwalzprofiliermaschine	72
5.2.1	Aktueller Stand und Aufgabenbeschreibung.....	72
5.2.2	Bilden des Lastpfad- und Knotenmodells.....	73
5.2.3	Analyse des Lastpfad- und Knotenmodells und Ableitung von Erkenntnissen	76
6	Evaluation des Lastpfad- und Knotenmodells anhand einer Probandenstudie. 81	
6.1	Studiendesign	81
6.2	Studienaufgaben.....	82
6.3	ProbandInnenauswahl	83
6.4	Auswertung der Ergebnisse.....	84
6.4.1	Vergleich vor und nach Schulung.....	84
6.4.2	Vergleich der Durchgänge	86
6.4.3	Vergleich der Aufgaben.....	87
6.4.4	Vergleich der Gruppen	87
6.4.5	Auswertung Kenntnisse der Modelle	88
6.5	Interpretation	89
6.5.1	Verbesserung durch Schulung.....	89
6.5.2	Unterschied der Signifikanz zwischen den Durchgängen	91
7	Zusammenfassung.....	93
8	Fazit und Ausblick.....	95
	Anhang A – Probandenstudie.....	XII
	Literaturverzeichnis	XXI
	Eigene Veröffentlichungen.....	XXX
	Betreute studentische Arbeiten.....	XXXII

Abkürzungsverzeichnis

C	Connector
C&CM	Contact and Channel Model
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement
HiWi	HilfswissenschaftlerIn
IDD	Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren
IPEK	Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Institut für Technologie
LSS	Leitstützstruktur
Pmd	Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente
TU	Technische Universität
VDI	Richtlinie des Verbandes Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer
WFP	Wirkflächenpaar
WiMi	Wissenschaftliche MitarbeiterIn

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Konzepte der Systemtheorie: a) Funktionales Konzept; b) Strukturales Konzept; c) Hierarchisches Konzept.....	7
Abbildung 2.2: Modell eines technischen Systems.....	8
Abbildung 2.3: Eigenschaften ergeben sich aus einer Kombination von Merkmal und Wert.	9
Abbildung 2.4: Unterscheidung der unterschiedlichen Eigenschaftsklassen nach HUBKA.	10
Abbildung 2.5: Produktmodellpyramide.	12
Abbildung 2.6: Product model framework nach MATTHIESEN ET. AL.....	13
Abbildung 2.7: C&C-Modell zur Identifikation funktionsrelevanter Gestaltparameter einer Schnellbauschraube.....	15
Abbildung 2.8: Darstellung von zwei verschiedenen Zuständen bei der Montage von Schrauben.	15
Abbildung 2.9: Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach VDI 2221.	17
Abbildung 2.10: Allgemeiner Prozess des Problemlösens.	18
Abbildung 2.11: Der Prozess des Gestaltens.....	19
Abbildung 2.12: Unterscheidung von Mechatronischen Maschinenelementen nach VORWERK-HANDING ET AL..	21
Abbildung 2.13: Darstellung des Messmodells am Beispiel einer Temperaturmessung; a) Darstellung der Topologie und Parameter; b) Graphische Darstellung des Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs; c) mathematische Darstellung des Modells der Messung.	24
Abbildung 4.1: Darstellung der Hierarchie von Entwicklungszielen am Beispiel einer Fabrik.	31
Abbildung 4.2: Zusammenhang von Ziel-, Ersatz- und Messgröße.	33
Abbildung 4.3: Weitergabe von Ersatzgrößen als Zielgrößen für die LieferantInnen der Subsysteme.....	34
Abbildung 4.4: Versuchsergebnisse zur Untersuchung der Abhängigkeit der elektrischen Lagerimpedanz von übertragenem Drehmoment in einem Industriegetriebe.	36
Abbildung 4.5: Zusammenhang der Funktion und der Gestalt eines Getriebemotors. Oben: Abbildung des Getriebemotors. Mitte: Ausschnitt der Funktionsstruktur des Getriebemotors. Unten: C&C ² -Modell der Funktion <i>Umformen</i> . Rot: Hervorhebung eines Lastpfades des Drehmomentes. Blau: Weitere Lastpfade innerhalb des C&C ² -Modells.....	37
Abbildung 4.6: Veränderliche Oberflächeneigenschaften. Links: Vergrößerung des Wirkflächenpaares aufgrund der Kraftübertragung; Rechts: Auszug aus der Auflistung der veränderlichen Oberflächeneigenschaften.	38
Abbildung 4.7: Sensor zwischen Wirkflächen eines Wirkflächenpaares.	39

Abbildung 4.8: Veränderliche Volumeneigenschaften. Links: Verwindung der Leitstützstruktur infolge der Momentenübertragung; Rechts: Auszug aus der Auflistung der veränderlichen Volumeneigenschaften.	39
Abbildung 4.9: Veränderungen bei Austausch einer Komponente.	40
Abbildung 4.10: Obere Hälfte: Ausschnitt eines Lastpfades der Funktion <i>Energie leiten</i> ; untere Hälfte: Ausschnitt eines Informationspfades der Funktion <i>Signal leiten</i>	42
Abbildung 4.11: Zusammenhang von Elementen der idealen Messkette, des C&C ² -Modells, der Teilfunktionen und den Bauteilen des Systems.	43
Abbildung 4.12: Beispielhafte Übertragungsfunktion von einem funktionsrelevanten Parameter zum Messergebnis für eine konstante Zielgröße.	45
Abbildung 4.13: Reihenschaltung von Federn als Beispiel für einen eindeutigen Lastpfad.	47
Abbildung 4.14: Parallelschaltung von Federn als Beispiel für parallele Lastpfade.	48
Abbildung 4.15: Oben: Seitenansicht einer elastischen Klauenkupplung; Mitte: Schnittansicht der Klauen mit C&C ² -Modell der Funktion <i>Energie leiten</i> , in der die Verzweigung des Kraftflusses deutlich wird; Unten: C&C ² -Modell der Funktion <i>Signal leiten</i> für das Messen der Ersatzgröße <i>Einfederung eines Zahns des Elastomerkranzes</i>	49
Abbildung 4.16: Berührungslos messbarer Effekt der Einfederungen infolge des Drehmoments.	50
Abbildung 4.17: Freikörperbild eines allgemeinen Festkörpers mit Primärfunktion: Leiten und Umformen und der notwendigen sekundären Funktion: Gleichgewicht herstellen.	52
Abbildung 4.18: Unterfunktionen der Kraftleitung innerhalb des C&C ² -Modells der Funktion <i>Umformen</i> ; Oben: Hervorhebung des Lastpfades des Drehmomentes; Unten: Hervorhebung der Lastpfade der Reaktionskräfte.	53
Abbildung 4.19: Ausschnitt des Informationspfades des Drehmoments innerhalb des C&C ² -Modells für den Fall der Nutzung von F ₂ als Ersatzgröße.	54
Abbildung 4.20: Lastpfad innerhalb des C&C ² -Modells der Funktion <i>Drehmoment erzeugen</i>	55
Abbildung 4.21: Vergleich von C&C ² -Modell der Funktion <i>Drehmoment leiten</i> (links), Lastpfad des angreifenden Momentes (rechts).	56
Abbildung 4.22: Rechenregeln für Knoten.	57
Abbildung 4.23: Unterscheidung von Bereichen in denen die Aufteilung der radialen Last berücksichtigt werden muss am Beispiel der Messung der radialen Kraftanteile in einer geradverzahnten Verzahnung einer Getriebewelle.	58
Abbildung 4.24: Das Element <i>Umformen</i> mit Ein- und Ausgang der Flussgröße und der resultierenden Reaktionsgröße.	59
Abbildung 4.25: Umformung und entstehende Reaktionen am Beispiel einer Getriebeausgangswelle.	60

Abbildung 4.26: Das Element <i>Wandeln</i> mit unterschiedlichen Arten von Ein- und Ausgangsgrößen und den notwendigen Reaktionsgrößen.....	60
Abbildung 4.27: Wandlung und entstehende Reaktionen am Beispiel eines Elektromotors.	62
Abbildung 4.28: Ein- und Ausleitung der Flussgröße in ein System bei vorliegender Vorspannung am Beispiel einer Batterie.	63
Abbildung 4.29: Element <i>Speicher</i> mit <i>Ein-</i> und <i>Ausspeichern</i> zu unterschiedlichen Zeitpunkten.	64
Abbildung 4.30: Lastspeicher am Beispiel der Speicherung des Impulses in beschleunigter Masse.	65
Abbildung 4.31: Anteil der Flussgröße im statischen Lastpfad in Abhängigkeit der Frequenz der eingeleiteten Flussgröße.	65
Abbildung 5.1: Industriescheibenbremse inkl. Systemgrenze des weiterzuentwickelnden Systems	67
Abbildung 5.2: Vereinfachte Darstellung einer hydraulischen Industriescheibenbremse.	68
Abbildung 5.3: Modellierung des drucklosen Zustandes mittels Lastpfad- und Knotenmodell. Schwarz primärer Lastpfad; Rot Lastpfad infolge der Reaktionen. .	69
Abbildung 5.4: Modellierung des geöffneten Zustandes mittels Lastpfad- und Knotenmodell. Schwarz primärer Lastpfad; Rot Lastpfad infolge der Reaktionen. .	70
Abbildung 5.5: Modellierung des geregelten Zustandes mittels Lastpfad- und Knotenmodell. Schwarz: Primärer Lastpfad; Rot: Lastpfad infolge der Reaktionen; Blau: Elemente die im Lastpfad der Messung liegen.	71
Abbildung 5.6: Beschreibung der Komponenten der Flachwalzprofiliermaschine.....	73
Abbildung 5.7: Lastpfad- und Knotenmodell für Kippmoment aus der Schnittebene heraus.	74
Abbildung 5.8: Lastpfad- und Knotenmodell für Kippmoment in die Schnittebene herein.	75
Abbildung 5.9: Lastpfad- und Knotenmodell für die horizontale Walzkraft.	76
Abbildung 5.10: Ausschnitt für möglichen Bereich einer Messung des Biegemomentes als Ersatzgröße.	77
Abbildung 5.11: Ausschnitt für möglichen Bereich einer Messung des Druckes als Ersatzgröße.	78
Abbildung 5.12: Ausschnitt für möglichen Bereich einer Messung des Druckes als Ersatzgröße.	78
Abbildung 5.13: Ausschnitt für möglichen Bereich einer Messung des Druckes oder der Biegung als Ersatzgröße.	79
Abbildung 5.14: Ausschnitt für die Erzeugung eines zusätzlichen Lastpfades, dessen Reaktionen als Ersatzgröße gemessen werden können.	80
Abbildung 6.1: Aufbau der Crossover-Studie.....	82
Abbildung 6.2: ProbandInnenzusammenstellung.	83
Abbildung 6.3: Vergleich der Bewertung vor und nach der Schulung aller Durchgänge.	84

Abbildung 6.4: Häufigkeit der, durch Schulung erzielten Verbesserung.	85
Abbildung 6.5: Auswertung 1. Durchgang.	86
Abbildung 6.6: Auswertung 2. Durchgang.	86
Abbildung 6.7: Auswertung des Vergleichs der beiden Durchgänge.	87
Abbildung 6.8: Auswertung des Vergleichs der Aufgaben.	87
Abbildung 6.9: Auswertung des Vergleichs der beiden Gruppen.	88
Abbildung 6.10: Vergleich der Kenntnisse der Analysemodelle. Links: Kraftfluss; Rechts: C&C-Modell.	88
Abbildung 6.11: Verbesserung durch Schulung. Links: Gruppe A; Rechts Gruppe B.	90
Abbildung 6.12: Vergleich der Gruppenbewertung bei unterschiedlichen Aufgaben. Links: Aufgabe <i>Bremse</i> ; Rechts: Aufgabe <i>Schieber</i>	91
Abbildung 6.13: Vergleich der Neuheit der vermittelten Inhalte für die beiden Durchgänge.	92
Abbildung 8.1: Beschreibung Schieber.	XII
Abbildung 8.2: Zur Auswahl stehende Sensoren.	XIII
Abbildung 8.3: Beschreibung Bremse.	XIV
Abbildung 8.4: Zur Auswahl stehende Sensoren.	XV

Kurzfassung

Die Motivation für diese Arbeit ergibt sich aus dem steigenden Bedarf an Daten, die für die Digitalisierung der Industrie genutzt werden können. Für viele EntwicklerInnen von technischen Systemen ist die Erfassung von Prozess- und Zustandsgrößen jedoch noch Neuland und die Integration von Sensoren wird von vielen Unternehmen als zu kostspielig bei zu geringem Mehrwert empfunden. Es fehlt an Erfahrung, mit welchen Ersatzgrößen die gewünschten Prozess- und Zustandsgrößen indirekt und kostengünstig gemessen werden können. Die bestehenden Hilfsmittel in Form von Katalogen sind für das Finden von Sensoren für die entsprechenden Messgrößen gedacht, unterstützen jedoch nicht bei der Auswahl der passenden Ersatzgrößen. Abhilfe kann durch Modelle und Methoden geschaffen werden, die den Zusammenhang zwischen der bestehenden Gestalt und der Messbarkeit von Prozess- und Zustandsgrößen darstellen.

Der Contact & Channel-Ansatz (C&C²-Ansatz) bietet sich als ein entsprechendes Metamodell für die Analyse von Systemen an. Jedoch können mittels C&C²-Ansatz lediglich Messgrößen gefunden werden, die an Gestaltelementen anzufinden sind, die direkt mit der Funktion der Leitung der Größe zusammenhängen.

In dieser Forschungsarbeit wird der C&C²-Ansatz um die Elemente Wandlung und Umformung erweitert. Dies ermöglicht, gezielt Reaktionen zu identifizieren, die an Gestaltelementen der sekundären Funktionen gemessen werden können. Es wird gezeigt, welche Besonderheiten beim Umformen, Wandeln und bei parallelen Lastpfaden berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich wird beschrieben, wie mögliche Störgrößen für den Vergleich verschiedener Ersatzgrößen genutzt werden können.

Anhand dieser Ergebnisse wird das Lastpfad- und Knotenmodell als Weiterentwicklung des C&C²-Ansatzes vorgestellt, das als Metamodell Regeln für die Bildung von Analysemodellen liefert, die bei der Suche nach Ersatzgrößen unterstützen.

Die Abbildung mittels Lastpfad- und Knotenmodells wird anhand von zwei technischen Produkten gezeigt, indem aus der Literatur bekannte Ersatzgrößen für die gewünschten Prozessgrößen nachgebildet werden.

Die Anwendbarkeit bzw. die Wirkung der Anwendung des Lastpfad- und Knotenmodells wird anhand einer Probandenstudie gezeigt. In dieser Probandenstudie wird die Auswahl der Ersatzgröße von ProbandInnen ohne Kenntnis des Lastpfad- und Knotenmodells mit der Auswahl von Ersatzgrößen von ProbandInnen mit Kenntnis des Lastpfad- und Knotenmodells verglichen. Eine statistisch signifikante Verbesserung in der Auswahl der Ersatzgrößen der ProbandInnen, die auf die Kenntnis des Lastpfad- und Knotenmodells zurückzuführen ist, zeigt, dass eine Verbesserung der sensorischen Weiterentwicklung von technischen Produkten mithilfe des Lastpfad- und Knotenmodells erzielt werden kann.

Abstract

The motivation for this work results from the increasing demand for data that can be used for the digitalization of the industry. For many developers of technical systems, however, the acquisition of process and state variables is still unexplored territory and the integration of sensors is considered by many companies to be too costly with too little added benefit. There is a lack of experience, with which alternative values the desired process and state variables can be measured indirectly and cost-effectively. The existing tools in the form of catalogs are intended for finding sensors for the corresponding measured values, but do not support the selection of suitable alternative values. This problem can be solved by models and methods which show the connection between the existing design and the measurability of process and state values.

The Contact & Channel Approach (C&C²-Approach) provides an appropriate meta-model for the analysis of systems. However, the C&C² Approach can only be applied to find measurands that can be found at design elements that are directly related to the function of the channel of the value.

In this research work, the C&C² Approach is extended by the elements change and transformation. This allows to identify specific reactions that can be measured at design elements of the secondary functions. It is shown what specifics have to be considered for forming, transforming and parallel load paths. In addition, it is described how possible disturbances can be used for the comparison of different alternative values.

Based on these results, the load path and node model is presented as a further development of the C&C² Approach. The load path and node model, as a meta model, provide rules for the formation of models for the analysis, which supports the search for alternative values.

The representation with the load path and node model is shown on the basis of two technical products by reproducing the known alternative values from literature for the desired process variables.

The applicability or rather the effect of the application of the load path and node model is shown by means of a study. In this study the selection of alternative values of test persons without knowledge of the load path and node model is compared with the selection of alternative values of test persons with knowledge of the load path and node model. A statistically significant improvement in the selection of alternative values of the test persons is shown, which can be attributed to the knowledge of the load path and node model. This shows that an improvement of the sensory further development of technical products can be achieved using the load path and node model.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Verfügbarkeit von Daten erhält im Kontext der Digitalisierung der Industrie immer größere Bedeutung. Eine Kernidee ist die Integration von Sensoren in physische Objekte wie Produkte,¹ um die Verfügbarkeit von Daten zu steigern. Die Daten dieser *Smart Products* können zum Beispiel Potentiale zur Verbesserung des Leistungsangebotes aufzeigen.² BAUERNHANS� zeigt in einer Studie jedoch, dass ein großes Hemmnis bei der flächendeckenden Nutzung von Smart Products das Verhältnis aus Anschaffungskosten und dem zeitnahen Nutzen für die Produktorganisation ist.³ Ein großer Einfluss auf die Kosten von Produkten zeigt sich in den Personalkosten der Produktentwicklung.⁴ Eine Beobachtung, die der Autor im Austausch mit EntwicklerInnen technischer Systeme immer wieder getätigt hat, ist die fehlende Erfahrung darüber, welche Größen in einem System gemessen werden können. Zusätzlich fehlt den Entwicklern von Sensoren häufig die Erfahrung darüber, wie die messbaren Größen für die Detektion von Prozess- oder Zustandsgrößen genutzt werden können. Kataloge, wie zum Beispiel der *Leitfaden Sensorik für Industrie 4.0*, herausgegeben vom VDMA, versuchen mithilfe von Beispielen EntwicklerInnen von technischen Systemen Anregungen zu bieten, die passenden Sensoren für die gewünschte Prozess- oder Zustandsgröße zu finden.⁵ Es bieten sich jedoch häufig mehrere Möglichkeiten an, die Zustands- oder Prozessgrößen indirekt zu erfassen, wie VORWERK-HANDING ET. AL für die Auflagerkraft eines Reifens in einem Formula-Student-Wagen zeigt.⁶ Bei der Auswahl der Größe, die tatsächlich gemessen wird, können Kataloge nicht helfen, da die Restriktionen und Potentiale innerhalb eines technischen Systems vielfältig sind. Ein Konflikt liegt darin, möglichst standardisierte und kalibrierte Sensoren zu verwenden, um den Kalibrierungsaufwand des gesamten Systems gering zu halten, oder spezielle Sensorik, die im System kalibriert werden muss, zu verwenden. Bei standardisierten und kalibrierten Sensoren besteht die Gefahr, dass das System angepasst werden muss und dadurch die bestehende mechanische Funktion verschlechtert wird. Bei der Verwendung spezieller Sensorik, die im bestehenden System kalibriert werden, oder sogar noch entwickelt werden muss, besteht die Gefahr, dass sich der Entwicklungsaufwand für eine geringe Stückzahl nicht lohnt oder der Aufwand der Kalibration für eine große Stückzahl zu hohe Kosten produziert. Einfache Lösungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie die Produktstruktur, die bestehende Funktion und die bestehende Gestalt berücksichtigen. Dafür werden bei

¹ Vgl. Anderl, R. Picard, André et al. (2015) S.13.

² Vgl. Dörr et al. (2019) S. 802

³ Vgl. BAUERNHANS� (2017) S. 68.

⁴ Vgl. FELDHUSEN, GROTE (2013) S. 29.

⁵ Vgl. Fleischer et al. (2018) S. 10-11

⁶ Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2018) S. 5

einfachen Lösungen charakteristische Größen als indirekte Messung der gewünschten Prozess- und Zustandsgrößen verwendet und so der Aufwand, der bei der Integration von Sensoren entsteht, verringert.⁷

Einen neuen Ansatz stellt die Entwicklung sensorintegrierender Maschinenelemente dar, der den Konflikt zwischen notwendigen Anpassungen des bestehenden Systems und der Verwendung von standardisierten und kalibrierten Sensoren auflösen soll. Aktuell werden häufig verwendete Maschinenelemente, wie zum Beispiel Lager oder Zahnriemen zu sensorintegrierenden Maschinenelementen entwickelt, deren Verwendung in bestehenden Systemen Aufschluss über die Zustands- und Prozessgrößen liefern können.⁸ Alternativ können Systeme analysiert werden, um zu prüfen, welche Komponenten eine charakteristische Belastung erfahren. Werden hierbei Komponenten gefunden, die auch in anderen Systemen verwendet werden, kann die weiter entwickelte Komponente auch für zukünftige Entwicklungen verwendet werden.

Die Schwierigkeit liegt in der Auswahl der richtigen Komponente, die eine einfache indirekte Messung der Zustands- und Prozessgrößen ermöglicht. Hierfür fehlt oft die Erfahrung, wie aus bestehendem Wissen über die Zusammenhänge im System die richtigen Komponenten für eine sensorische Weiterentwicklung ausgewählt werden. Bei fehlender Erfahrung wird die Anwendung passender Modelle und Methoden umso wichtiger.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit liegt darin die fehlende Erfahrung hinsichtlich der Integration von Sensoren mit passenden Methoden und Modellen zu kompensieren und somit die Entwicklung von sensorintegrierenden Komponenten zu verbessern. Als Basis sollen entsprechende bestehende Analysemodelle durch neue Ansätze erweitert werden, um systematisch Größen zu identifizieren, die als indirekte Messungen Rückschlüsse auf die gewünschten Prozess- und Zustandsgrößen bieten. Zusätzlich soll anhand eines Analysemodells eine schnelle Bewertung von Messgrößen und den entsprechenden Orten möglich sein, um den Lösungsraum, der bei einer systematischen Suche sehr groß werden kann,⁹ früh zu reduzieren.

1.3 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in insgesamt acht Kapitel. In Kapitel 1 wird die Motivation und die Gliederung dieser Arbeit erläutert.

Im folgenden Kapitel 0 wird zum Stand der Forschung zuerst auf die Grundlagen der Konstruktionsmethodik eingegangen, die für das Verständnis einer methodischen Entwicklung von Produkten notwendig sind. Zusätzlich werden aktuelle Ansätze für die Modellierung von Produkten gezeigt. Der Fokus wird hierbei auf die Produktmodellpyramide von

⁷ Vgl. Vogel, Kirchner (2019) S. 3719 und Matthiesen et al. (2014) S. 57-58

⁸ Siehe Harder, Kirchner (2019) und Großkurth, Martin (2019).

⁹ Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2018) S. 5

SAUER und den C&C²-Ansatz gelegt. Anschließend wird der aktuelle Stand in der Entwicklung von sensorintegrierenden Maschinenelementen vorgestellt. Zuletzt werden die Grundlagen für eine Bewertung verschiedener Lösungen von Messungen vorgestellt, um eine Basis für die Auswahl verschiedener Lösungen im Produktentwicklungsprozess zu bilden.

Darauf aufbauend werden in Kapitel 0 die identifizierten Defizite im Stand der Forschung präsentiert und darauf basierende Forschungsfragen vorgestellt, die in den darauffolgenden Kapiteln beantwortet werden.

Anschließend werden in Kapitel 1 die zentralen Modelle für die Integration von Sensoren erarbeitet. Hierbei wird zuerst das Modell für die Unterscheidung von Ziel- und Ersatzgrößen vorgestellt, um anschließend anhand dieses Verständnisses den C&C²-Ansatz auf seine Anwendbarkeit zur Identifikation von Ersatzgrößen zu prüfen und für die Identifikation von sekundären Effekten zu erweitern. Darauf aufbauend wird das Lastpfad- und Knotenmodell vorgestellt, das die Erkenntnisse aus der Analyse des C&C²-Ansatzes aufgreift und den Fokus der modellbasierten Analyse auf die Aufteilung und Manipulation der Signale legt, die innerhalb eines technischen Systems geleitet werden.

Mithilfe des in Kapitel 1 vorgestellten Lastpfad- und Knotenmodells werden in Kapitel 0 zwei technische Systeme analysiert und Möglichkeiten für die Integration von Sensoren diskutiert. Hierbei soll die Abbildung mittels Lastpfad- und Knotenmodells dahingehend überprüft werden, ob bereits bekannte Lösungen ebenfalls mit dem Lastpfad- und Knotenmodell gefunden und gleich bewertet werden können.

In Kapitel 1 wird anhand einer Probandenstudie das pragmatische Merkmal des neuen Modells überprüft. Hierbei wird eine Studie vorgestellt, in der ProbandInnen das Modell und die Arbeit damit in einer kurzen Schulung beigebracht wird und die Verbesserung der Analysefähigkeit anhand von zwei Aufgaben gemessen wird.

Kapitel 1 und 1 bilden den Abschluss der Arbeit, in denen die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst, interpretiert und offene Fragen für weitere Forschung vorgestellt werden.

2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für das Verständnis der in den folgenden Kapiteln 0, 1, 0 und 1 diskutierten Inhalte vorgestellt. Abschnitt 2.1 erläutert die Grundlagen der Konstruktionsmethodik, indem zuerst das nötige Verständnis von Modellen und Methoden und anschließend die Modellierung technischer Systeme dargelegt werden. Abschließend wird der Prozess der methodischen Produktentwicklung beschrieben. Eine besondere Stellung nehmen dabei der C&C²-Ansatz und der Prozess der Gestaltung ein. In Abschnitt 2.3 werden die Grundlagen für die Bewertung von Messsystemen vorgestellt. Maßgeblich wird sich hierbei auf das mathematische Modell der Messung und die Unsicherheit konzentriert, da dies die Basis für die Bewertung von Messsystemen bildet.

2.1 Grundlagen Konstruktionsmethodik

Unter Konstruktionsmethodik versteht man ein geplantes Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme, die sich aus den Erkenntnissen der Konstruktionswissenschaft und der Denkpsychologie, aber auch aus den Erfahrungen in unterschiedlichen Anwendungen ergeben haben.¹⁰

Mit dieser Definition grenzt sich die Konstruktionsmethodik von der Konstruktionswissenschaft insofern ab, als dass die Konstruktionswissenschaft die Analyse technischer Systeme zum Ziel hat¹¹, die Konstruktionsmethodik dagegen auf die Anwendung der Erkenntnisse der Konstruktionswissenschaft abzielt. Hierfür werden unter anderem Modelle und darauf basierende Methoden verwendet.¹² In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Konstruktionsmethodik, darunter der Zusammenhang von Modellen und Methoden, die Modellierung von Produkten und technischen Systemen sowie der Produktentwicklungsprozess vorgestellt.

2.1.1 Modelle und Methoden

Modelle dienen als zentrale Hilfsmittel für die Lösung von Problemen.¹³ Sie bilden die Realität gedanklich, oder stofflich zweckmäßig ab¹⁴ und reduzieren somit die Komplexität der Realität.¹⁵ Das Modell weist hierbei Analogien zum Original auf und ermöglicht so Rückschlüsse auf das Original.¹⁶ Zusätzlich können anhand von Modellen Prognosen

¹⁰ Pahl et al. (2007) S. 10.

¹¹ Vgl. Pahl et al. (2007) S. 10.

¹² Vgl. Ehrlenspiel (2009) S. 694 und Gramlich (2013) S. 13-14.

¹³ Vgl. VDI 2221 -1 (2019) S. 15.

¹⁴ Vgl. Lindemann (2009) S. 333.

¹⁵ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013) S. 21.

¹⁶ Vgl. Lindemann (2009) S.333.

oder Vorhersagen über das Verhalten von Originalen getätigt werden.¹⁷ Der Anwendungserfolg eines Modells ist maßgeblich von der Vereinfachung geprägt. So sollte ein Modell auf möglichst einfachen Regeln beruhen, die dynamisch angepasst werden können,¹⁸ um die maximale Einfachheit erreichen zu können.

Die allgemeine Modelltheorie nach STACHOWIAK¹⁹ bildet die Grundlage für das Verständnis von Modellen. Hiernach ist ein Modell durch seine drei Hauptmerkmale - *Abbildungsmerkmal*, *Verkürzungsmerkmal* und *pragmatisches Merkmal* - geprägt.²⁰

Das *Abbildungsmerkmal* bestimmt, dass Modelle Originale abbilden und Rückschlüsse auf das Original Zulassen und das Original ebenfalls ein Abbild sein kann.²¹ Das *Verkürzungsmerkmal* besagt, dass das Original nicht vollständig abgebildet wird, sondern lediglich die dem Zweck angemessenen Attribute enthält.²² Alle nicht benötigten Attribute werden bei der Abbildung vernachlässigt. Der Zweck eines Modells wird durch das *pragmatische Merkmal* bestimmt, das besagt, dass die Modelle nicht eindeutig den Originalen zugeordnet werden können und eine Ersatzfunktion erfüllen.²³ Die einzelnen Merkmale eines Modells können nicht unabhängig betrachtet werden, da das *Verkürzungsmerkmal* und das *Abbildungsmerkmal* durch den Zweck der Modellbildung und damit dem *pragmatischen Merkmal* beeinflusst werden.²⁴ Für die methodische Produktentwicklung spielen Produktmodelle, ablauforientierte Modelle und Prozessmodelle eine wichtige Rolle.²⁵

Metamodelle nehmen in Entwicklung komplexer Systeme eine besondere Rolle ein.²⁶ Sie enthalten selbst kein Wissen, das für die Problemlösung verwendet werden kann, dienen aber der Entwicklung spezieller Modelle, in denen das spezielle Wissen, das zur Problemlösung benötigt wird abgebildet werden kann.²⁷ MATTHIESEN beschreibt ein Metamodell als ein Modell mit Regeln und Elementen, das zur Modellbildung genutzt wird.²⁸

Ein weiteres Hilfsmittel in der Produktentwicklung bilden *Methoden*, die als planmäßiges Vorgehen zu verstehen sind, das zur Zielerreichung dient.²⁹ LINDEMANN ergänzt dieses Verständnis und führt auf, dass Methoden zusätzlich regelbasierte Vorgehen sind.³⁰ Sie dienen damit als Handlungs- und Denkempfehlungen in der Produktentwicklung.³¹ Methoden grenzen sich von Vorgehensmodellen dadurch ab, dass Vorgehensmodelle die

¹⁷ Vgl. Gramlich (2013) S. 12.

¹⁸ Vgl. Meboldt (2008) S. 152-153

¹⁹ Siehe Stachowiak (1973).

²⁰ Vgl. Stachowiak (1973) S. 131-133.

²¹ Vgl. Stachowiak (1973) S. 131.

²² Vgl. Stachowiak (1973) S. 132.

²³ Vgl. Stachowiak (1973) S. 132-133.

²⁴ Vgl. Würtenberger (2018) S. 21.

²⁵ Siehe Gramlich (2013) S. 12.

²⁶ Vgl. Meboldt (2008) S. 203

²⁷ Vgl. Meboldt (2008) S. 104

²⁸ Vgl. Matthiesen (2020) S. 18

²⁹ Vgl. VDI 2223 (2004) S. 88.

³⁰ Vgl. Lindemann (2009) S. 133.

³¹ Vgl. Gramlich (2013) S.12.

durchzuführenden Schritte beschreiben und Methoden das Regelwerk zur Bearbeitung der Arbeitsschritte liefern.³² Eine Kombination von verschiedenen Einzelmethoden, Hilfsmitteln und Instrumenten wird Methodik genannt.³³ Somit steht der Begriff *Konstruktionsmethodik* für eine Kombination verschiedener regelbasierter Vorgehen, unter Verwendung von Hilfsmitteln und Instrumenten zum Entwickeln und Konstruieren.³⁴

Die *Gemeinsamkeit von Modellen und Methoden* liegt darin, dass sie beide zielgerichtet eingesetzt werden.³⁵ Hierbei beschreiben Modelle Objekte und Methoden Arbeitsschritte, die der Zielerreichung dienen. Zusätzlich benötigen Methoden die entsprechenden Modelle, da sie die für die Methoden notwendigen Zusammenhänge abbilden.³⁶ Idealerweise sind Methoden und Modelle auf einander abgestimmt, sodass lediglich die für die Methoden relevanten Sachverhalte abgebildet sind.³⁷

In diesem Zusammenhang konzentriert sich diese Arbeit auf die Bereitstellung entsprechender Modelle, um die methodische Sensorintegration zu verbessern.

2.1.2 Modellierung von Produkten und technischen Systemen

HUBKA bezeichnet ein System als Ganzes, das durch eine endliche Menge an Elementen, die nach bestimmten Regeln geordnet sind, und zwischen denen ganz bestimmte Relationen vorliegen.³⁸ Das System grenzt sich durch seine Systemgrenze von der Umgebung ab und bietet über Ein- und Ausgänge die Möglichkeit des Austausches mit der Umgebung.³⁹

Technische Systeme

Nach ROPOHL gibt es drei Konzepte von Systemen, die unterschiedliche Aspekte der Systeme in den Vordergrund stellen. Im *strukturellen* Konzept, das in Abbildung 2.1 b) skizziert ist, geht es um die Vielfalt möglicher Beziehungsgeflechte der Elemente. Das System wird als Ganzes betrachtet, die Einzelteile dürfen nicht unabhängig voneinander betrachtet werden.⁴⁰ Für eine Beschreibung des Zusammenspiels von Bauteilen wird häufig ein strukturelles Konzept verwendet. Das *funktionale* Systemkonzept, das in Abbildung 2.1 a) schematisch dargestellt ist, stellt das Systemverhalten in der Umgebung in den Vordergrund. Das System wird als Blackbox betrachtet und wird über den Zusammenhang der Ein- und Ausgänge beschrieben.⁴¹ Der Weg zwischen Ein- und Ausgang wird somit nicht

³² Vgl. Lindemann (2009) S.57.

³³ Vgl. VDI 2223 (2004) S. 88.

³⁴ Vgl. Zitat aus Pahl et al. (2007) S. 10 zu Beginn von Abschnitt 2.1.

³⁵ Vgl. Gramlich (2013) S. 13.

³⁶ Vgl. Freund (2018) S. 11.

³⁷ Vgl. Gramlich (2013) S. 13.

³⁸ Vgl. Hubka (1984) S. 11.

³⁹ Vgl. Ehrlenspiel (2009) S. 19.

⁴⁰ Vgl. Ropohl (2009) S. 75.

⁴¹ Vgl. Ropohl (2009) S. 75-76.

abgebildet. Für eine lösungsneutrale Beschreibung der Funktion wird häufig ein funktionales Konzept gewählt. Das *hierarchische* Konzept, das in Abbildung 2.1 c) skizziert ist, stellt den Zusammenhang von Sub- und Supersystemen in den Vordergrund. Elemente eines Systems können ein eigenes Subsystem bilden und Systeme können Elemente eines Supersystems sein. Für eine Detailbetrachtung können die Subsysteme fokussiert werden und für eine übergeordnete Betrachtung wird das Supersystem herangezogen.⁴² Der Zweck der Modellierung des Systems bestimmt die Systemgrenze und damit die Granularität der Systemabbildung.⁴³

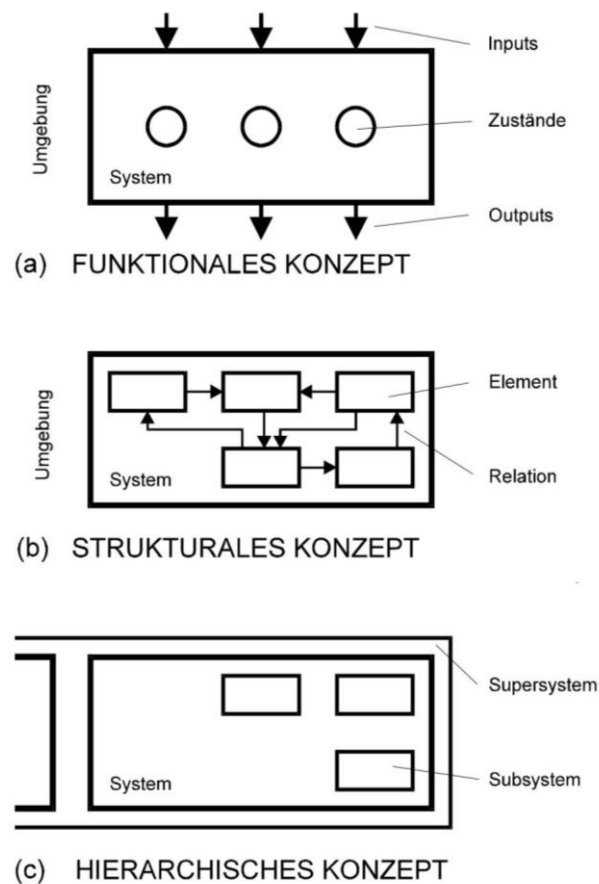


Abbildung 2.1: Konzepte der Systemtheorie: a) Funktionales Konzept; b) Struktureles Konzept; c) Hierarchisches Konzept.⁴⁴

Bei *technischen Systemen* handelt es sich um Systeme, die künstlich geschaffen sind, um einen bestimmten Zweck zu erfüllen.⁴⁵ *Technische Produkte* können somit als *technische Systeme* betrachtet werden,⁴⁶ die zur Lösung technischer Aufgaben dienen⁴⁷ und über ihre

⁴² Vgl. Ropohl (2009) S.77.

⁴³ Vgl. Ehrlenspiel (2009) S.21.

⁴⁴ Bildquelle: Ropohl (2009) S. 76

⁴⁵ Vgl. Ehrlenspiel (2009) S. 25.

⁴⁶ Vgl. Ehrlenspiel (2009) S.26.

⁴⁷ Vgl. Pahl et al. (2007) S.39.

Ein- und Ausgangsgrößen mit der Umgebung interagieren, vgl. Abbildung 2.2. Somit kann die Funktion eines technischen Produkts im Sinne des funktionalen Konzeptes als Blackbox durch den Zusammenhang der Ein- und Ausgänge abgebildet werden. Die Elemente bzw. Bauteile des Produktes stehen im Sinne des strukturalen Konzeptes in Relation zueinander. Zusätzlich ist ein Produkt Teil eines Supersystems und die Elemente bilden wieder eigene Subsysteme.⁴⁸ In der Entwicklung technischer Produkte werden alle genannten Konzepte der Modellierung angewandt. Ferner zeigt sich in technischen Prozessen, dass eine Energie-, Stoff- oder Signalumsetzung dominierend ist und die weiteren Flüsse begleitend auftreten.⁴⁹ Ein Beispiel für einen Energieumsatz als Hauptfunktion bietet ein Getriebe, das Energie leitet und umformt. Ein Ventil, das die Leitung und damit die Dosierung von Stoffen als Funktion hat, bietet ein Beispiel für einen Stoffumsatz als Hauptfunktion. Ein Beispiel für einen Signalumsatz als Hauptfunktion bietet ein Dehnungssensor, der ein mechanisches Signal in ein elektrisches Signal wandelt und leitet. Dass alle Hauptfunktionen der Subsysteme in einem gesamten Produkt auftreten können, bestätigt den hierarchischen Charakter von technischen Systemen.

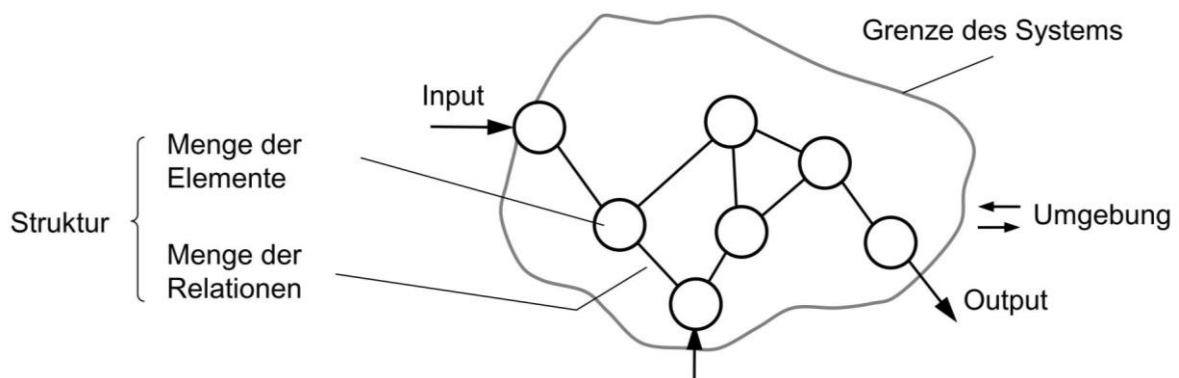


Abbildung 2.2: Modell eines technischen Systems.⁵⁰

Unterscheidung Merkmal und Eigenschaft

Zur Beschreibung von technischen Systemen werden Eigenschaften herangezogen.⁵¹ Eine Besonderheit bilden dabei die Soll-Eigenschaften, die sich durch die Anforderungen an das Produkt ergeben.⁵² Eigenschaften setzen sich nach LINDEMANN aus einem Merkmal und einer Ausprägung des Merkmals zusammen,⁵³ vgl. Abbildung 2.3. Ein Merkmal ist ein „Charakteristikum [...] eines Systems, das durch seine Ausprägung [...] als Eigenschaft wahrgenommen wird.“⁵⁴ So ist zum Beispiel der Durchmesser einer Welle das Merkmal, das mit seiner Ausprägung 30 mm als Eigenschaft der Welle beobachtet oder

⁴⁸ Vgl. Kirchner (2020) S.112.

⁴⁹ Vgl. FELDHUSEN, GROTE (2013) S. 243.

⁵⁰ Bildquelle: Beetz (2018) S. 25 als Überarbeitung von Hubka (1984) S. 15

⁵¹ Vgl. Birkhofer (1980) S.5.

⁵² Vgl. Birkhofer (1980) S.6.

⁵³ Vgl. Lindemann (2009) S. 330.

⁵⁴ Lindemann (2009) S. 333.

gemessen werden kann. Damit entspricht die Definition den Merkmalen und den Eigenschaften der Darstellung in Konstruktionskatalogen. Im Kopf werden die Merkmale für die Gliederung des Zugriffsteils verwendet. Die Ausprägungen sind in den Feldern als unterschiedliche Möglichkeiten der Umsetzung aufgeführt.⁵⁵ Auch für den Vergleich von Systemen können die Merkmale und die Ausprägungen herangezogen werden. WÄLDELE führt die Begriffe *Objektgleichheit*, *Objektähnlichkeit* und *Objektunterschiedlichkeit* ein.⁵⁶ Bei Objektgleichheit verfügen die Objekte über die gleichen Merkmale und Ausprägungen. Bei Objektähnlichkeit besitzen die Objekte die gleichen Merkmale, jedoch sind die Ausprägungen unterschiedlich. Bei Objektverschiedenheit weisen die Objekte unterschiedliche Merkmale auf.

Eigenschaft=		
Merkmal	+	Wert
Wellenwerkstoff	+	16MnCr5
Wellendurchmesser	+	30 mm
Max. übertragbares Drehmoment	+	100 Nm

Abbildung 2.3: Eigenschaften ergeben sich aus einer Kombination von Merkmal und Wert.⁵⁷

Anhand Abbildung 2.3 wird auch deutlich, dass nicht alle Eigenschaften direkt beeinflusst werden können. Die EntwicklerIn kann den Wellenwerkstoff und den Durchmesser festlegen, das maximale übertragbare Drehmoment kann jedoch nicht festgelegt werden und ist ein Resultat von Werkstoff, Durchmesser und der Kerbwirkung der Feingeometrie. HUBKA führt daher die *inneren* und die *äußeren* Eigenschaften ein. Die inneren Eigenschaften repräsentieren das innere Gefüge und sind von außen schwer wahrnehmbar.⁵⁸ Darunter fällt zum Beispiel die Festigkeit, vgl. Abbildung 2.4. Die äußeren Eigenschaften wirken auf die Umgebung und können von außen erfasst werden. Darunter fällt zum Beispiel die Eigenschaft *Funktion*, die sich unter anderem aus der inneren Eigenschaft *Festigkeit* ergibt, vgl. Abbildung 2.4. Zusätzlich führt HUBKA die Kategorie der elementaren Konstruktionseigenschaften ein. Die elementaren Konstruktionseigenschaften werden von der KonstrukteurIn eingestellt und dienen der Erreichung der äußeren Zieleigenschaften.⁵⁹

⁵⁵ Vgl. Birkhofer (1980) S. 6

⁵⁶ Vgl. Wäldele (2012) S. 17

⁵⁷ Bildquelle: Wäldele (2012) S. 16 mit redaktioneller Überarbeitung und eigener Ergänzung.

⁵⁸ Vgl. Hubka (1984) S. 47.

⁵⁹ Vgl. Hubka (1984) S. 120

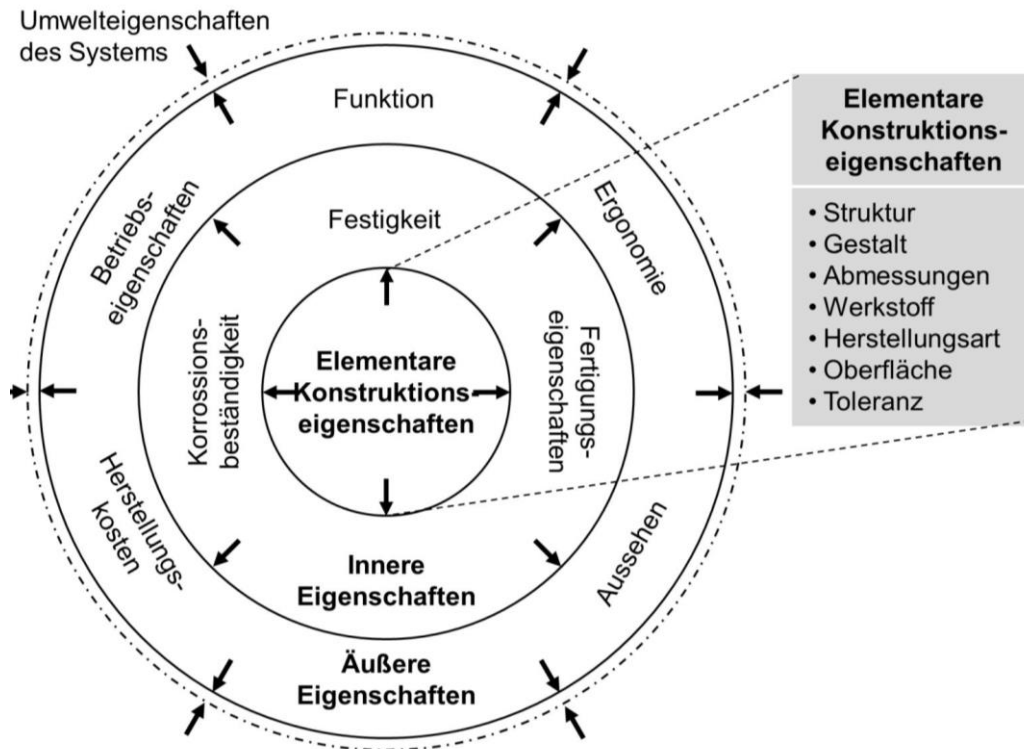


Abbildung 2.4: Unterscheidung der unterschiedlichen Eigenschaftsklassen nach HUBKA.⁶⁰

WÄLDELE greift die Unterscheidung von Eigenschaften, die beeinflusst werden können, und Eigenschaften, die sich aus den anderen Eigenschaften ergeben, auf und nennt diese *unabhängige* und *abhängige* Eigenschaften.⁶¹ Zusätzlich werden Eigenschaftsnetzwerke eingeführt, in denen die Zusammenhänge der unabhängigen und der abhängigen Eigenschaften innerhalb eines Produktes abgebildet werden.⁶²

WEBER greift den Zusammenhang von beeinflussbaren und abhängigen Objekten ebenfalls auf, jedoch unterscheidet er zwischen *Merkmalen* und *Eigenschaften*.⁶³ Hierbei umfassen die Merkmale die Gestalt eines Produktes, die von der EntwicklerIn festgelegt wird.⁶⁴ Die Eigenschaften bilden das Verhalten des Produktes ab und können nicht direkt festgelegt werden, sondern müssen über die Merkmale eingestellt werden.⁶⁵ So unterscheiden sich die Merkmale nach WEBER von den unabhängigen Eigenschaften nach WÄLDELE dahingehend, dass die Merkmale nach WEBER die gesamte Gestalt abbilden und die unabhängigen Eigenschaften nach WÄLDELE erst durch das Eigenschaftsnetzwerk die Gestalt abbilden. Der Zusammenhang der Merkmale und der Eigenschaften spielt nach WE-

⁶⁰ Bildquelle: Gramlich (2013) S. 20.

⁶¹ Siehe Wäldele (2012) S. 56ff.

⁶² Siehe Wäldele (2012) S. 82ff.

⁶³ Siehe Weber (2012).

⁶⁴ Vgl. Weber (2012) S. 31

⁶⁵ Vgl. Weber (2012) S.32

BER eine wichtige Rolle. So wird in der Analyse der Zusammenhang zwischen den Eigenschaften und den Merkmalen ergründet. Das gewonnene Verständnis wird durch die richtige Anpassung der Merkmale in der Synthese verwendet.⁶⁶

Die in VDI 2221 präsentierte Definition unterscheidet keine beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Objekte, sondern besagt, dass Merkmale Eigenschaften sind, die besonders hervorgehoben werden sollten.⁶⁷ Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird das Verständnis von *Merkmalen* und *Eigenschaften* nach WEBER verwendet, indem die Merkmale die gesamte Produktgestalt abbilden und die Eigenschaften das Verhalten des Produktes beschreiben.

Produktmodelle

Produktmodelle, die im Fokus dieser Arbeit stehen, bilden die relevanten Informationen der entsprechenden Produkte ab.⁶⁸ Die Abbildung ist dabei aufgabenspezifisch und zweckorientiert.⁶⁹ Auch Produktmodelle dienen dem Zweck der Problemlösung. Für ProduktentwicklerInnen ist die Verwendung von verschiedenen Modellen essenziell,⁷⁰ denn für jede Aufgabe und Phase der Entwicklung kann die notwendige Konkretisierungsstufe unterschiedlich sein.⁷¹ Ein Modell, das verschiedene Partialmodelle vereint, ist die Produktmodellpyramide nach SAUER,⁷² die in Abbildung 2.5 gezeigt ist. Die Produktmodellpyramide gliedert sich in die Ebenen *Funktion*, *Effekte*, *Wirkprinzip* sowie *Gestalt*. Mit den Partialmodellen der einzelnen Ebenen kann das Produkt auf verschiedenen Konkretisierungsstufen beschrieben werden. Die abstrakteste Ebene bildet dabei die Beschreibung des Produktes anhand von *Funktionen*. Die detaillierteste Ebene ist die Beschreibung des Produktes anhand der *Gestalt*. Während der Entwicklung durchläuft das Produkt die verschiedenen Ebenen von oben nach unten und die Beschreibung wird immer konkreter. Dadurch nehmen die Eigenschaften des Produktes und die Anzahl an möglicher Varianten zu.⁷³ Auf jeder Ebene werden die gefundenen Lösungen mit den Anforderungen verglichen. Eine Nichterfüllung der Anforderungen kann auch wieder einen Sprung auf eine abstraktere Ebene erfordern, um alternative Lösungen zu finden. Es müssen auch nicht immer alle Ebenen durchlaufen werden, wenn bereits Lösungen auf einer konkreteren Ebene bekannt sind.

⁶⁶ Vgl. Weber (2012) S. 36ff

⁶⁷ Vgl. VDI 2221 -1 (2019) S. 5.

⁶⁸ Vgl. Wäldele (2012) S. 28.

⁶⁹ Vgl. Lindemann (2009) S. 334.

⁷⁰ Vgl. Matthiesen et al. (2019b) S. 2.

⁷¹ Vgl. Wäldele (2012) S. 28.

⁷² Vgl. Sauer (2006) S. 68.

⁷³ Vgl. Sauer (2006) S. 67.

Auf der Ebene der *Funktionen* erfolgt die Beschreibung des Produktes lösungsneutral als Blackbox.⁷⁴ Die Hauptfunktion des Produktes kann in verschiedene Unterfunktionen geteilt werden, um die Komplexität der Entwicklungsaufgabe zu reduzieren.⁷⁵ Für die Beschreibung von Produkten existieren verschiedene Ansätze, so können die Produkte anhand spezieller Funktionen oder anhand allgemeiner Funktionen beschrieben werden.⁷⁶

Auf der Ebene der *Effekte* werden die Funktionen und Teilfunktionen durch physikalische, biologische und chemische Effekte realisiert. Effekte sind nach Sauer die abstrakteste Beschreibung zur Verwirklichung von Funktionen.⁷⁷ Nach Roth sind Funktionen nur dann realisierbar, wenn für sie ein Effekt oder eine Effektkette bekannt ist.⁷⁸ Nach SAUER liegt die Schwierigkeit darin, den Effekt und den Funktionsträger gelöst voneinander zu betrachten. Aufgrund dieser Schwierigkeit der Abstraktion beginnt die Lösungssuche häufig erst auf Ebene der Wirkprinzipien.⁷⁹ Auch SAUER betont, dass das Finden eines alternativen physikalischen Effektes oder einer Effektkette den Gestaltungsspielraum vergrößert und somit ein erhebliches Potential für innovative Lösungen bietet.⁸⁰

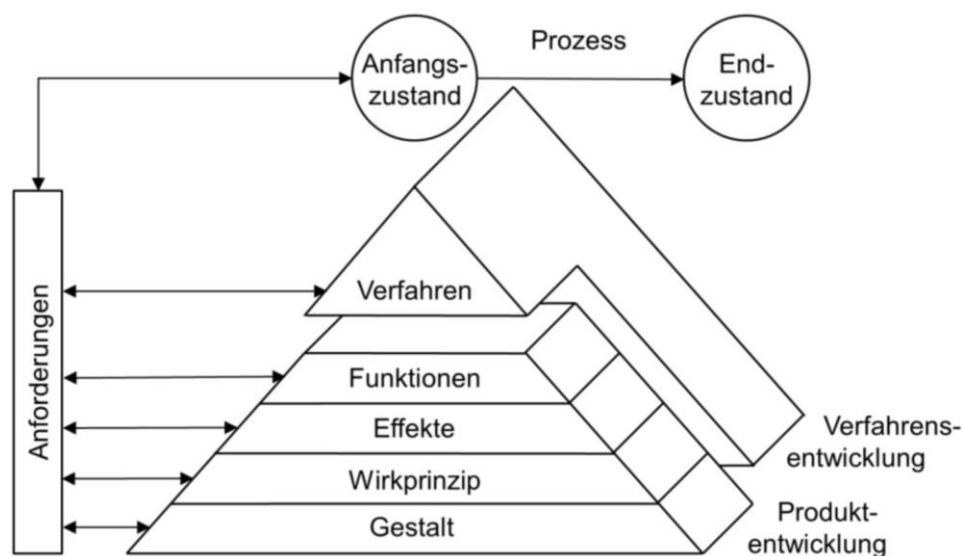


Abbildung 2.5: Produktmodellpyramide.⁸¹

Die nächste Ebene der Konkretisierung bildet die Modellierung anhand von *Wirkprinzipien*. Auf der Ebene der Wirkprinzipien wird die erste geometrische und stoffliche Festlegung des Produktes durchgeführt.⁸² So enthält ein Wirkprinzip einen physikalischen

⁷⁴ Vgl. Sauer (2006) S. 75.

⁷⁵ Vgl. FELDHUSEN, GROTE (2013) S. 242.

⁷⁶ Vgl. Pahl et al. (2007) S. 44ff und Roth (2000) S. 81ff

⁷⁷ Vgl. Sauer (2006) S. 76.

⁷⁸ Vgl. Roth (2000) S. 107.

⁷⁹ Vgl. Sauer (2006) S. 67

⁸⁰ Vgl. Sauer (2006) S. 76.

⁸¹ Bildquelle: Sauer (2006) S. 68.

⁸² Vgl. Sauer (2006) S. 77.

Effekt und stoffliche und geometrische Angaben darüber, wie der physikalische Effekt realisiert wird.⁸³

Die *Gestaltebene* bildet die konkreteste Beschreibung eines Produktes. Hier erfolgt die räumliche Festlegung von Materie.⁸⁴ Die Strukturierung erfolgt dabei anhand von Formelementen, Einzelteilen und Baugruppen.⁸⁵ In der Gestalt sind somit alle Informationen für die Herstellung des Produktes vorhanden.

Eine Möglichkeit der Kategorisierung der Produktmodelle bieten der Zweck und die Phase der Entwicklung, in der sie eingesetzt werden können.⁸⁶ MATTHIESEN ET AL. liefert hierfür das product model framework, das in Abbildung 2.6 dargestellt ist. Es existieren vier Aufgabencluster: *Organisieren*, *Einsicht erhalten*, *Entwicklung definieren* und *das Unbekannte festhalten*,⁸⁷ vgl. Abbildung 2.6. Des Weiteren gibt es innerhalb der Aufgabencluster zwei verschiedene Phasen, die *Entwicklung und Konzeption* und die *Entwicklung*.⁸⁸

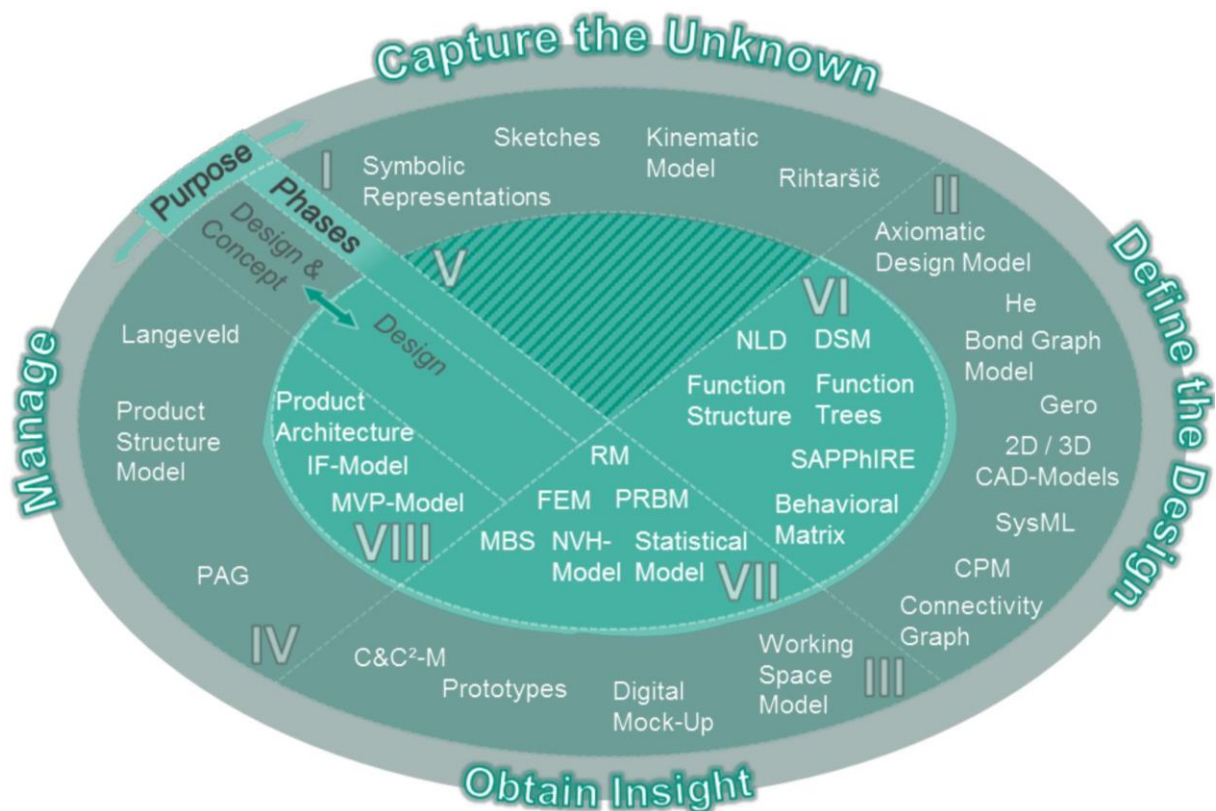


Abbildung 2.6: Product model framework nach MATTHIESEN ET AL.⁸⁹

⁸³ Vgl. Pahl et al. (2007) S. 54.

⁸⁴ Vgl. Rude (1998) S. 301.

⁸⁵ Vgl. Sauer (2006) S. 79.

⁸⁶ Vgl. Matthiesen et al. (2019b) S. 6ff.

⁸⁷ Vgl. *Manage*, *Obtain Insight*, *Define the Design* und *Capture the Unknown* in Matthiesen et al. (2019b).

⁸⁸ Vgl. *Design and Concept* und *Design* in Matthiesen et al. (2019b).

⁸⁹ Bildquelle: Matthiesen et al. (2019b) S. 8.

C&C²-Modell

In diesem Abschnitt wird das C&C²-Modell als Produktmodell genauer vorgestellt. Das C&C²-Modell ist ein grafisches Modell, das die Funktion, das Verhalten und die qualitative Gestalt eines Produktes beschreibt.⁹⁰ Es ist im product model framework dem Cluster III zugeordnet und dient dazu, Einsicht in das Konzept und die Entwicklungsphase zu erhalten,⁹¹ vgl. Abbildung 2.6. Ein C&C²-Modell dient der Beschreibung des Zusammenhangs der Gestaltelemente und der Funktion des Produktes und verknüpft so die Ebene der Funktion und die Ebene der Gestalt in der Produktmodellpyramide nach SAUER.⁹² Für die Entwicklung eines C&C²-Modells wird der C&C²-Ansatz verwendet, bei dem es sich um ein Metamodell handelt, welches Regeln und Elemente für die Bildung von C&C²-Modellen liefert.⁹³ Für die Modellbildung stehen die drei Grundelemente *Wirkflächenpaar*, *Leitstützstruktur* und *Connector*, die in Abbildung 2.7 gezeigt sind, zur Verfügung. *Wirkflächenpaare* dienen in einem technischen System dem *Austausch* von Energien, Stoffen und Informationen und entstehen zeitweise oder dauerhaft bei Kontakt von zwei Wirkflächen.⁹⁴ *Leitstützstrukturen* bilden Volumina, durch die Energien, Stoffe und Informationen zwischen den Wirkflächenpaaren geleitet werden.⁹⁵ *Connectoren* bilden die Verbindung des Modells mit seiner Umgebung und bilden die wirkungsrelevanten Eigenschaften, die außerhalb des Gestaltungsbereiches liegen, ab.⁹⁶ Die Modellbildung basiert auf drei Grundhypothesen: *Eine Funktion eines Grundelements kann nur durch die Wechselwirkung mit mindestens einem weiteren Grundelement erfolgen; Die Funktion eines Systems benötigt mindestens zwei Wirkflächenpaare und eine Leitstützstruktur; Ein System wird nur aus Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen zusammengesetzt.*⁹⁷ *Connectoren* können bei Bedarf durch Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen abgebildet werden.⁹⁸

Abbildung 2.7 zeigt das C&C-Modell für den Einschraubvorgang einer Schnellbauschraube. Die Erstellung des C&C-Modells hat hier den Zweck die Gestaltparameter der Schnellbauschraube, die für die Funktionserfüllung wichtig sind, zu identifizieren. Für die Identifikation der funktionsrelevanten Parameter müssen die identifizierten Wirkflächenpaare *WFP1* und *WFP2* genauer betrachtet werden. Nach der Identifikation der relevanten Gestaltparameter können diese verändert werden, um die Funktion anzupassen.

⁹⁰ Vgl. Matthiesen et al. (2019b) S. 8.

⁹¹ Vgl. Matthiesen et al. (2019b) S. 8.

⁹² Vgl. Matthiesen et al. (2019b) S. 7.

⁹³ Vgl. Matthiesen (2020) S. 18.

⁹⁴ Vgl. Matthiesen (2002) S. 50.

⁹⁵ Vgl. Matthiesen (2002) S. 51.

⁹⁶ Vgl. Matthiesen (2020) S. 20.

⁹⁷ Vgl. Matthiesen (2002) S. 53-54.

⁹⁸ Vgl. Matthiesen et al. (2019b) S. 8.



Abbildung 2.7: C&C-Modell zur Identifikation funktionsrelevanter Gestaltparameter einer Schnellbauschraube.⁹⁹

Prozessmodelle

Technische Produkte dienen als Mittel, um den gewünschten Zweck einer Zustandsänderung von Zustand A zu Zustand B zu erreichen.¹⁰⁰ Für die Beschreibung von Prozessen existieren in der Produktentwicklung neben Produktmodellen auch *Prozessmodelle*. Prozessmodelle dienen der Beschreibung technischer Prozesse, die eine definierte Zustandsänderung eines Objektes innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls erzeugen.¹⁰¹ Nach GRAMLICH stehen für die Zustandsänderungen nur stoffliche Gebilde zur Verfügung.¹⁰² Wie auch für Produkte, existieren verschiedene Modelle für die Abbildung von Prozessen,¹⁰³ die sich teilweise stark voneinander unterscheiden. Diese Arbeit beruft sich jedoch hauptsächlich auf das Sequenzmodell, daher wird im Folgenden nur dieses Modell vorgestellt.

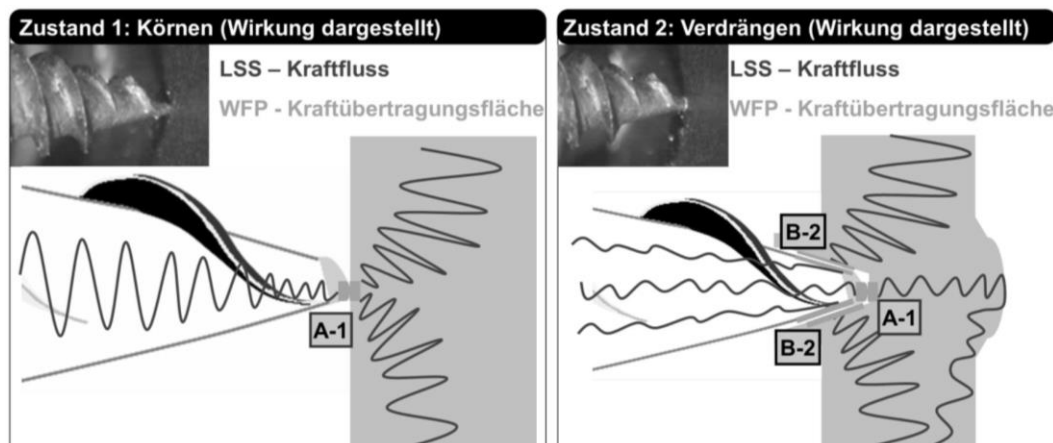


Abbildung 2.8: Darstellung von zwei verschiedenen Zuständen bei der Montage von Schrauben.¹⁰⁴

⁹⁹ Bildquelle: Matthiesen (2020) S. 29.

¹⁰⁰ Vgl. Heidemann (2001) S. 21 und Pahl et al. (2007) S. 42.

¹⁰¹ Vgl. Hubka (1984) S. 23-29.

¹⁰² Vgl. Gramlich (2013) S. 63-64.

¹⁰³ Roos (2018), Freund (2018) und Beetz (2018) zählen beispielsweise verschiedene Prozessmodelle auf.

¹⁰⁴ Bildquelle: Thau (2013) S. 86.

Das *Sequenzmodell* dient dazu, dynamische Prozesse in zeitliche Sequenzen zu unterteilen und so die Komplexität der Konstruktionsaufgabe zu reduzieren.¹⁰⁵ Mindestens zwei Zustände ergeben eine Sequenz. Hierbei kann in jedem Zustand eine unterschiedliche Funktion erfüllt werden und dabei werden verschiedene Kombinationen von Wirkflächenpaaren, Leitstützstrukturen und Connectoren benötigt.¹⁰⁶ Entsteht ein neues Wirkflächenpaar oder ein Wirkflächenpaar wird aufgelöst, ändert sich die Funktion des Systems oder eine zusätzliche Funktion entsteht und das System wird in einem neuen Zustand abgebildet.¹⁰⁷ Zusätzlich können auch neue Zustände entstehen, wenn sich die Werte der funktionsrelevanten Parameter stark verändern.¹⁰⁸ Abbildung 2.8 zeigt eine Sequenz beim Montieren von Schrauben anhand der zwei Zustände *Körnen* und *Verdrängen*. Das Wirkflächenpaar A-1 von Zustand *Körnen* bleibt erhalten und spielt auch bei der Funktion des Zustands *Verdrängen* eine Rolle. Zusätzlich entsteht ein weiteres Wirkflächenpaar B-2, das für die Funktion relevant ist. Die Zuordnung der Zustände muss nicht rein chronologisch erfolgen, sondern kann auch anhand logischer Zustände erfolgen, die nicht zeitlich chronologisch angeordnet sind und auch wiederholt auftreten können.¹⁰⁹

2.1.3 Produktentwicklungsprozess

Für die Beschreibung des Prozesses der Produktentwicklung existieren viele verschiedene Modelle, die ein geplantes Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen abbilden. Die VDI-Richtlinienreihe 222x stellt international anerkannte Erkenntnisse verschiedener Autoren zur Verfügung.¹¹⁰ Die VDI-Richtlinie (VDI) 2221 dient als Rahmenwerk für die detaillierte Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses, welchem die verschiedenen Methoden zugeordnet werden können.¹¹¹ Die sieben Arbeitsschritte *Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung*, *Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen*, *Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Struktur*, *Gliedern in realisierbare Module*, *Gestalten der maßgebenden Module*, *Gestalten des gesamten Produktes* und *Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben* werden hierbei prinzipiell der Reihe nach bearbeitet. Aufgrund des iterativen Charakters der Produktentwicklung kann zwischen den Arbeitsschritten vor- und zurückgesprungen werden.¹¹²

¹⁰⁵ Vgl. Albers et al. (2008) S.249-250.

¹⁰⁶ Vgl. Matthiesen (2020) S. 27-29.

¹⁰⁷ Vgl. Matthiesen, Ruckpaul (2012) S. 4-6.

¹⁰⁸ Vgl. Matthiesen et al. (2018a) S. 9.

¹⁰⁹ Vgl. Matthiesen et al. (2019a) S. 1386-1387.

¹¹⁰ Vgl. Weber (2012) S. 26.

¹¹¹ Vgl. VDI 2221 (1993).

¹¹² Vgl. VDI 2221 (1993) S. 9

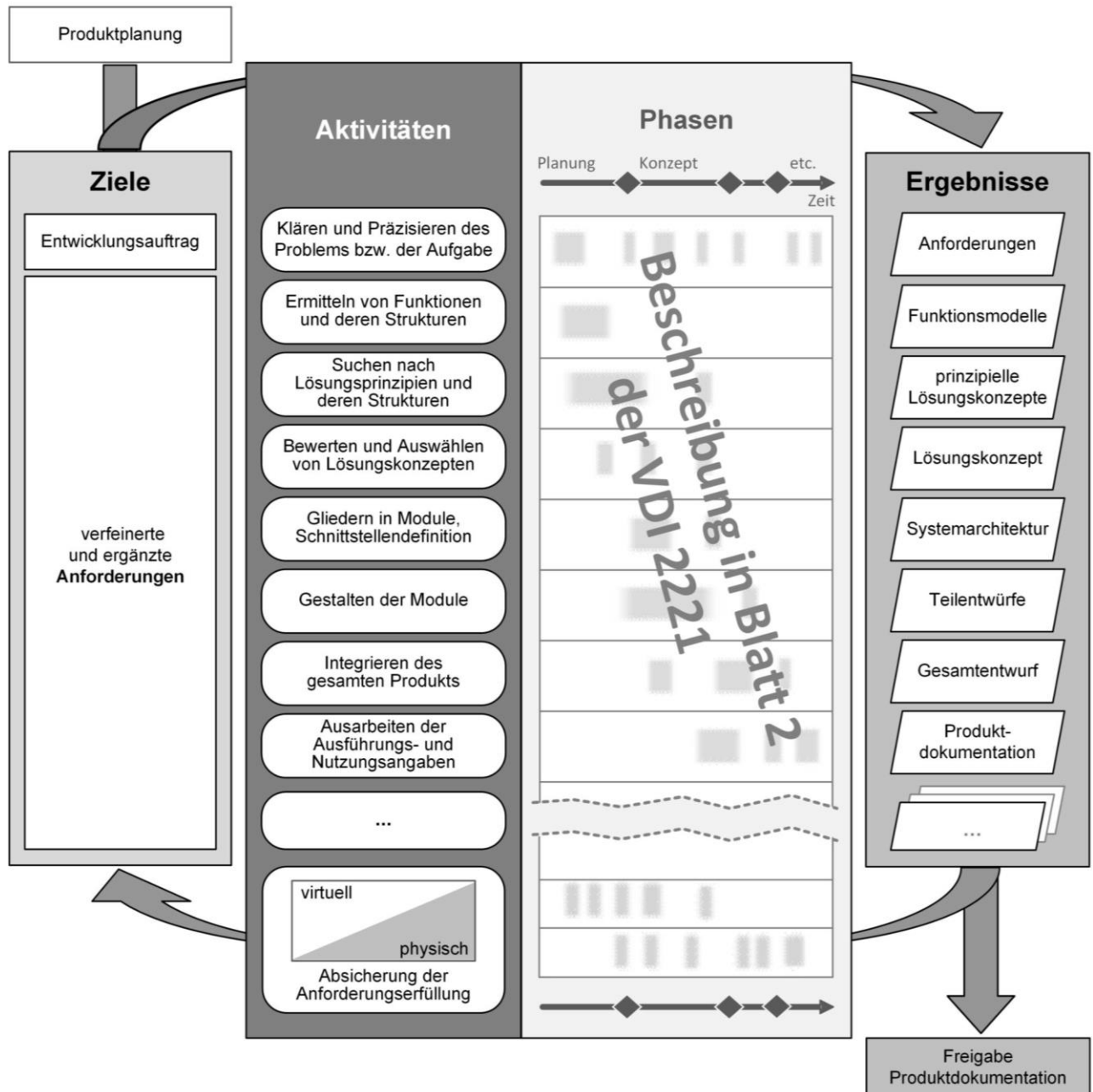


Abbildung 2.9: Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach VDI 2221.¹¹³

Die weiteren Richtlinien der Reihe gehen genauer auf die einzelnen Aktivitäten ein. So konzentriert sich VDI 2222 Blatt 1 auf die Aktivitäten 1-3 und damit auf das Ermitteln prinzipieller Lösungen.¹¹⁴ VDI 2222 Blatt 2 beschreibt die Erstellung von Konstruktionskatalogen und deren Verwendung und bietet somit ein Werkzeug für die Aktivitäten 1-3.¹¹⁵

Die VDI 2223 geht tiefer auf den Entwurfsprozess ein und damit auf die Aktivitäten 4-7.¹¹⁶ Der Entwurfsprozess ist maßgeblich durch die Tätigkeit Gestalten geprägt, hierbei

¹¹³ Bildquelle: VDI 2221 (1993) S. 9

¹¹⁴ Vgl. VDI 2222 (1997) S. 2.

¹¹⁵ Vgl. VDI 2222 (1997) S. 2.

¹¹⁶ Vgl. VDI 2222 (1997) S. 2.

wird die Gestalt als konkreteste Modellierung des Produktes festgelegt. Der Vorgang der Gestaltung ist stark von Iterationen geprägt,¹¹⁷ da die Entwicklung der Lösung ebenfalls zu einer Konkretisierung des Problems führt.¹¹⁸ Beim Gestalten können verschiedene Vorgehensweisen gewählt werden, um die Komplexität beherrschen zu können. Namentlich werden in der VDI 2223 das strategische und das operative Vorgehen genannt. Das strategische Vorgehen sieht vor, durch Gliederung und Aufteilung der Aufgabe die Anzahl der Iterationsschritte zu verringern.¹¹⁹ Beim operativen Vorgehen werden zuerst die wichtigen und dringlichen Elemente festgelegt und die anderen Elemente angepasst.¹²⁰ Während des gesamten Prozesses wechseln sich strategisches und operatives Vorgehen ab.¹²¹ Da viele Produkte mithilfe der Erfahrung von Vorgängerprodukten¹²² entwickelt werden, kann neben der Erfahrung der EntwicklerIn auch auf die Dokumentation der Vorgänger zurückgegriffen werden.¹²³ MATTHIESEN ET AL. betonen in Abbildung 2.11 die zentralen Eingangsgrößen der Gestaltung und heben die Bedeutung der Modelle hervor, die den Zyklus von Analyse des Gestaltfunktionszusammenhangs und Synthese durch Anpassung der Gestalt unterstützen.

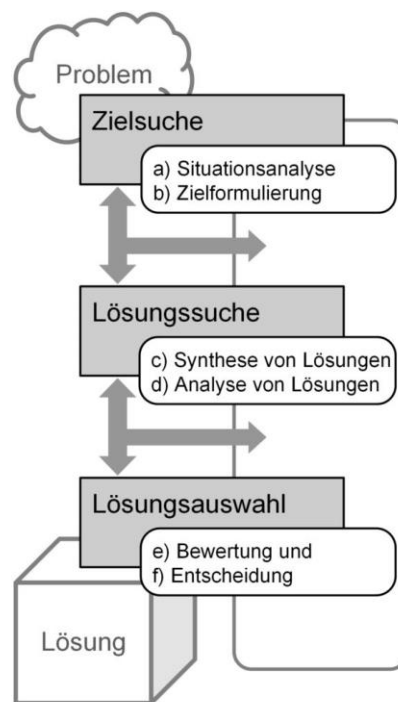


Abbildung 2.10: Allgemeiner Prozess des Problemlösens.¹²⁴

¹¹⁷ Vgl. VDI 2223 (2004) S. 23.

¹¹⁸ Vgl. Dorst, Cross (2001) S. 14.

¹¹⁹ Vgl. VDI 2223 (2004) S. 14-27.

¹²⁰ Vgl. VDI 2223 (2004) S. 39-42.

¹²¹ Vgl. VDI 2223 (2004) S.42-43.

¹²² Vgl. Albers et al. (2017) S. 4.

¹²³ Vgl. Matthiesen et al. (2018b) S.2.

¹²⁴ Bildquelle: VDI 2221 -1 (2019) S. 18.

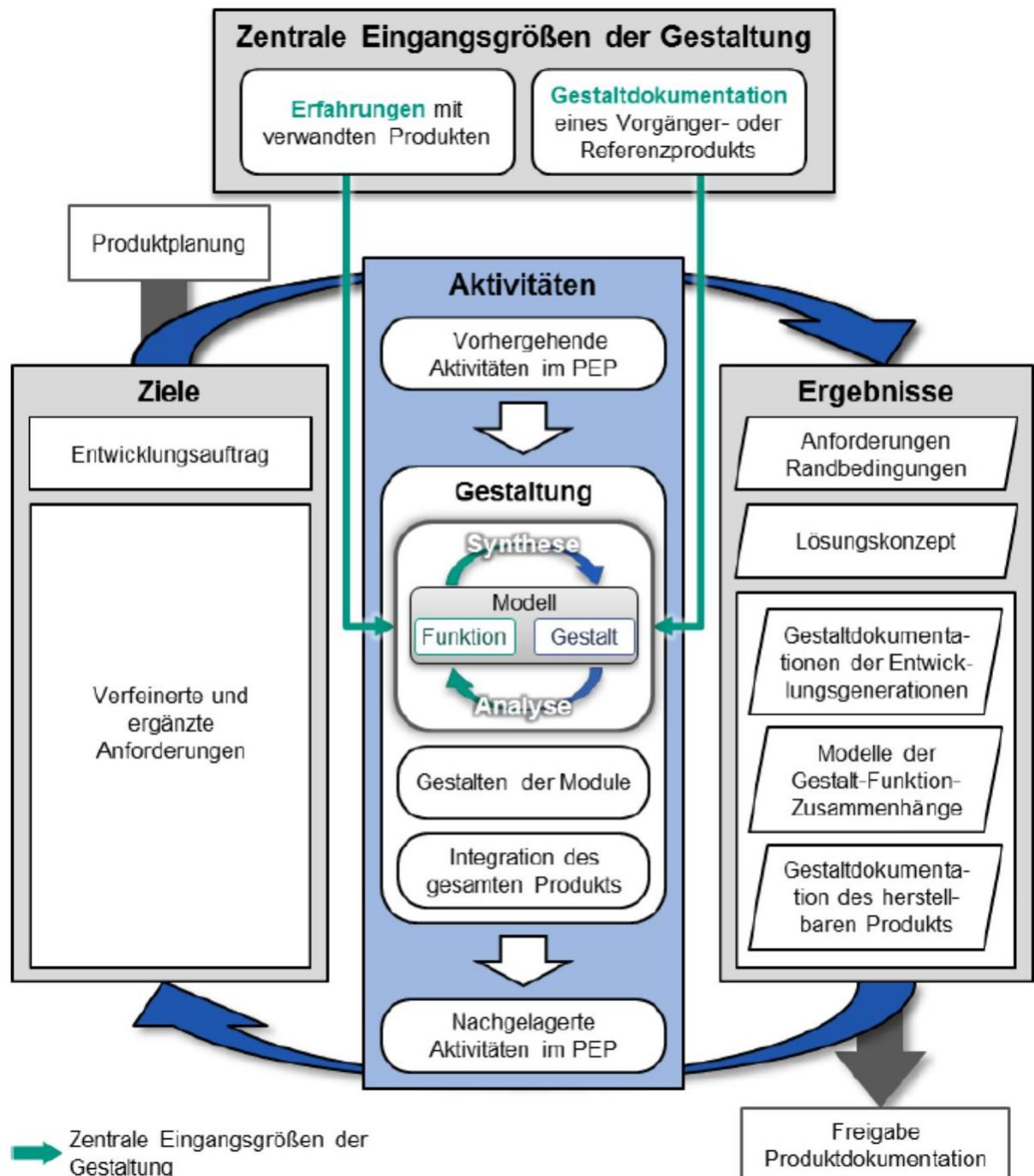


Abbildung 2.11: Der Prozess des Gestaltens.¹²⁵

2.2 Sensorintegrierende Maschinenelemente

Maschinenelemente, die eine sensorische Funktion für die Überwachung der Funktion eines Systems integrieren, werden *sensorintegrierende Maschinenelemente* genannt.¹²⁶ Als Überkategorie führen STÜCHELI UND MEBOLDT die *mechatronischen Maschinenelemente*

¹²⁵ Bildquelle: Matthiesen et al. (2018b) S. 2.

¹²⁶ Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2020) S. 24-25

ein, um dem Übergang von einer standardisierten, elementaren, mechanischen Komponente hin zu einem elementaren Subsystem in Kombination von Mechanik, Elektronik und der Datenverarbeitung Rechnung zu tragen.¹²⁷ Es werden die Unterkategorien *Sensorintegriertes Maschinenelement*, *Semi-Aktuatoren* und *Sensor-Aktor Fusion* eingeführt,¹²⁸ um den Schritt von einer rein mechanischen Komponente hin zu einem mechatronischen System noch weiter zu unterteilen. Es wird auch unterschieden zwischen mechatronischen Maschinenelementen, in die Sensoren integriert werden, und mechatronischen Maschinenelementen, die komplett neu entwickelt werden. Als Beispiele werden ein Wälzlager mit einem integrierten Drehzahlsensor und ein aktives Magnetlager genannt,¹²⁹ die beide die mechanische Funktion der Lagerung erfüllen, aber unterschiedliche Integrationsstufen hinsichtlich eines mechatronischen Systems aufweisen.

Es kann unterschieden werden, ob es sich um *sensorintegriertes* oder ein *sensorintegrierendes* Maschinenelement handelt. Als *sensorintegriertes* Maschinenelement kann ein Maschinenelement verstanden werden, das Sensoren integriert hat, mit diesen Sensoren wird die Funktion des Maschinenelements überwacht. Als Beispiel kann die Vorspannkraftüberwachung von Schrauben betrachtet werden.¹³⁰ Als *sensorintegrierendes* Maschinenelement kann ein Maschinenelement verstanden werden, dessen sensorische Integration nicht der Überwachung der Funktion des Maschinenelements dient, sondern der Messung von Prozess- oder Zustandsgrößen des übergeordneten Systems. Als Beispiel kann die Kraftmessung in einer Schraube genutzt werden, mit der Prozesskräfte im Walzvorgang von Blechen gemessen werden können.¹³¹

VORWERK-HANDING ET AL. führen eine weitere Kategorisierung von mechatronischen Maschinenelementen ein.¹³² In dieser Kategorisierung werden mechatronische Maschinenelemente in *sensorische* und *aktorische Maschinenelemente* unterschieden und die sensorischen Maschinenelemente weiter in *sensortragende*, *sensorintegrierende* und *sensorisch nutzbare Maschinenelemente* unterschieden, vgl. Abbildung 2.12. Die Unterscheidung erfolgt anhand der allgemeinen Funktionen nach ROTH und PAHL ET AL. und wie diese innerhalb des Maschinenelements miteinander verknüpft sind.¹³³ Ein *sensortragendes* Maschinenelement enthält einen Sensor, der eine Größe misst, die nicht mit der Funktion des Maschinenelements zusammenhängt.¹³⁴ *Sensorintegrierende Maschinenelemente* zeichnen sich dadurch aus, dass in sie ein Sensor integriert ist, der eine Größe misst, die mit der Funktion des Maschinenelements zusammenhängt und zusätzlich Rückschlüsse auf Prozess- oder Zustandsgrößen des Systems bietet.¹³⁵ *Sensorisch nutzbare Maschinenelemente*

¹²⁷ Vgl. Stücheli, Meboldt (2013) S. 267.

¹²⁸ Vgl. Stücheli, Meboldt (2013) S. 269.

¹²⁹ Vgl. Stücheli, Meboldt (2013) S. 265.

¹³⁰ Siehe zum Beispiel Kong et al. (2018).

¹³¹ Siehe zum Beispiel Groche, Brenneis (2014).

¹³² Siehe Vorwerk-Handing et al. (2020).

¹³³ Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2020) S. 25.

¹³⁴ Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2020) S. 25.

¹³⁵ Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2020) S. 25.

bilden selbst einen Sensor und es ist keine Trennung des Maschinenelements und des Sensors möglich.¹³⁶

Die Unterscheidung von *sensorintegrierenden* und *sensorisch nutzbaren Maschinenelementen* wird anhand der Art des messbaren Signals getroffen, da bei allen Beispielen für *sensorisch nutzbare Maschinenelemente* eine elektrische Eigenschaft gemessen wird.¹³⁷ In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Finden von messbaren Eigenschaften. Ob diese Eigenschaften durch einen zusätzlichen Wandler elektrisch messbar werden oder in der Komponente direkt elektrisch vorliegen, wird nicht unterschieden. Zusätzlich beschränkt sich diese Arbeit nicht auf das Finden von messbaren Eigenschaften in standardisierten Komponenten, sondern in Komponenten, die bereits im System vorliegen. Dies führt dazu, dass in dieser Arbeit keine Unterscheidung von *sensorintegrierenden* und *sensorisch nutzbaren Maschinenelementen* getroffen wird.

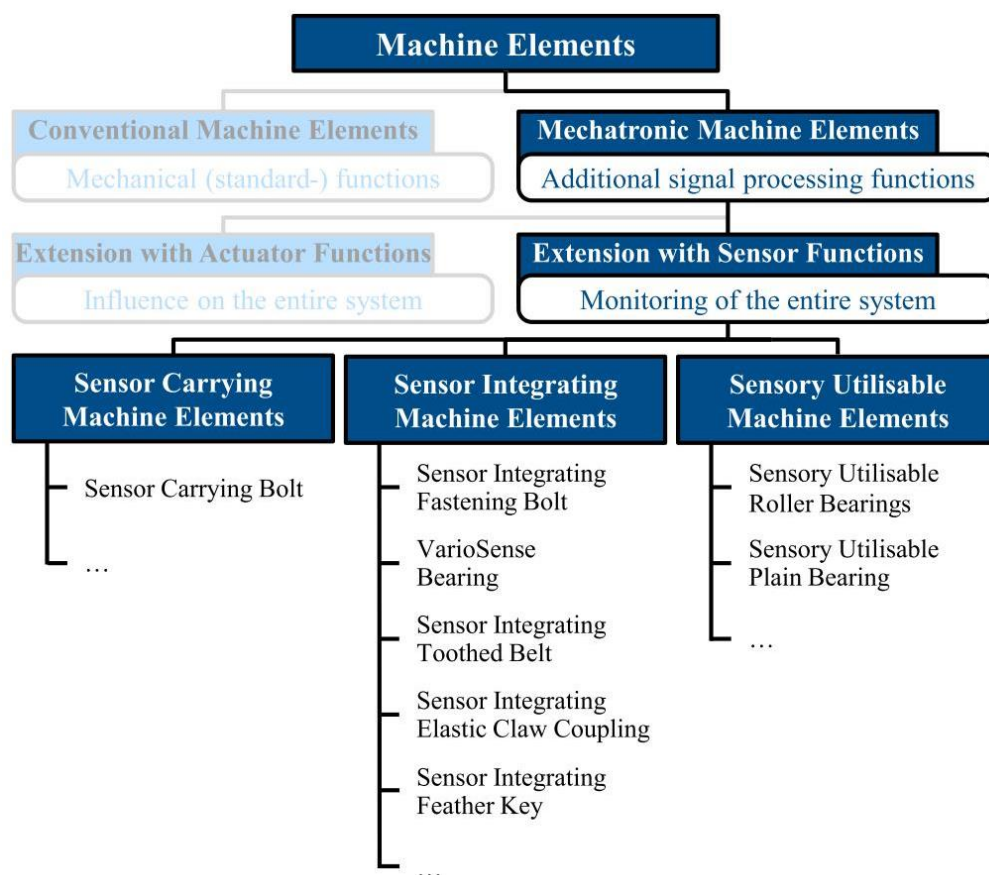


Abbildung 2.12: Unterscheidung von Mechatronischen Maschinenelementen nach VORWERK-HANDING ET AL..¹³⁸

¹³⁶ Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2020) S. 25.

¹³⁷ Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2020) S. 25-26.

¹³⁸ Bildquelle: Vorwerk-Handing et al. (2020) S. 31.

2.3 Grundlagen für die Bewertung von Messsystemen

*Messsystem: Kombination aus Messgeräten und oft anderen Geräten sowie bei Bedarf Reagenzien und Versorgungseinrichtungen, die so angeordnet und angepasst sind, dass sie Information liefern, um Messwerte innerhalb bestimmter Intervalle für Größen bestimmter Arten zu erhalten.*¹³⁹

Als Messsystem wird also das gesamte System, das für die Bestimmung von Größen genutzt wird, bezeichnet. Für die Bewertung von Güte und Qualitätskriterien von Messungen hat sich die Unsicherheitsbetrachtung nach der Richtlinie *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*¹⁴⁰ (kurz GUM) durchgesetzt.¹⁴¹ Die Basis für die Ermittlung der Messunsicherheit bildet hierbei das systematische zusammentragen von Kenntnissen, Aufstellen eines mathematischen Modells und die Einschätzung der relevanten Parameter und ihrer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.¹⁴² Jedes Element der Messkette kann separat als Transformation, die das Messsignal beeinflusst, betrachtet werden.¹⁴³ So kann jedes Element der Messkette einzeln bewertet werden. Diese Arbeit macht sich diese modulare Betrachtung der Messkette zu Nutze und zieht zum Vergleich verschiedener Messgrößen lediglich den Teil der Messkette zu Rate, der zwischen der eigentlich zu messenden Größe und der tatsächlich gemessenen Größe liegt. In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen vorgestellt, die für den Vergleich der verschiedenen Teilmessketten notwendig sind. Hierfür wird zunächst der Begriff Messmodell erklärt und anschließend der Begriff Messunsicherheit erläutert.

2.3.1 Messmodelle

Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 erläutert, unterscheiden sich Modelle und Methoden dahingehend, dass Modelle Abbildungen von realen Zusammenhängen sind¹⁴⁴ und Methoden Arbeitsschritte beschreiben.¹⁴⁵ Diese allgemeine Unterscheidung von Methoden und Modellen gilt auch im Zusammenhang mit Messungen.¹⁴⁶ Das *Modell* bildet reale Zusammenhänge ab, die Methode beschreibt, wie eine Messung durchgeführt wird. Da die Messgröße häufig nicht direkt gemessen wird, ist ein *mathematisches Modell*¹⁴⁷ der Messung notwendig, um über einen funktionellen Zusammenhang auf die Messgröße schließen zu können.¹⁴⁸

Heidenblut et al. unterscheiden das *Modell der Messung*:

¹³⁹ Zitat aus Brinkmann (2012) S. 50.

¹⁴⁰ Siehe JCGM 100 (2008).

¹⁴¹ Vgl. Sommer, Kessel (2014) S. 24.

¹⁴² Vgl. Sommer, Kessel (2014) S. 24.

¹⁴³ Vgl. Rossi et al. (2019) S. 1344-1345

¹⁴⁴ Vgl. JCGM 100 (2008) S. 4.

¹⁴⁵ Vgl. JCGM 100 (2008) S. 33.

¹⁴⁶ Vgl. Heidenblut et al. (2007) S. 495.

¹⁴⁷ Auch Messgleichung genannt. Vgl. Heidenblut et al. (2007) S. 496.

¹⁴⁸ Vgl. JCGM 100 (2008) S. 8.

$$X_{\text{IND}} = g(Y, X_1, \dots, X_n) \quad (2.1)$$

und das *Modell der Auswertung*:

$$Y = f(X_{\text{IND}}, X_1, \dots, X_n) \quad (2.2)$$

Das Modell der Messung beschreibt dabei die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen der Ausgabe des Sensors X_{IND} , der Größe Y , der die Messung gilt und den weiteren Einflussparametern X_i .¹⁴⁹ Das Modell der Messung kann auch grafisch dargestellt werden, vgl. Abbildung 2.13. Das Modell der Auswertung beschreibt dagegen, wie von den bekannten X_i und abgelesenen Parametern X_{IND} auf die Messgröße Y geschlossen werden kann.¹⁵⁰ Es bildet somit eine Umkehrfunktion des Modells der Messung bzgl. der Größe Y , der die Messung gilt. In den folgenden Kapiteln dieser Arbeit wird immer wieder das Verhältnis der tatsächlich gemessenen Größe X_{IND} und der Größe Y , der die Messung gilt herangezogen. Hierfür wird der Begriff der Übertragungsfunktion von Y zu X_{IND} herangezogen:

$$\frac{X_{\text{IND}}}{Y} = f(X_1, \dots, X_n) \quad (2.3)$$

Der Vergleich verschiedener Größen, die als tatsächlich gemessene Größen in Frage kommen, kann anhand verschiedener Eigenschaften der Gleichungen erfolgen. Es kann der Betrag herangezogen werden, um eine große Auflösung zu erreichen. Die Anzahl der Parameter kann genutzt werden, um den mathematischen Aufwand gering zu halten und mögliche Störeinflüsse durch die Parameter zu erhalten. Bei bekannten Parametern können die Toleranzen der Parameter genutzt werden, um eine Aussage über die Messgenauigkeit zu erhalten.

2.3.2 Messunsicherheit

Jede Abbildung verkürzt die tatsächlichen Zusammenhänge der Realität.¹⁵¹ Dies gilt ebenfalls für das mathematische Modell der Auswertung. Die Unvollständigkeit der Abbildung der tatsächlichen physikalischen Zusammenhänge wird als *Messunsicherheit* bezeichnet.¹⁵² Die Unsicherheit der Abbildung der Realität ergibt sich aus der *Datenunsicherheit*, die die Ungenauigkeit der verwendeten Daten beschreibt, der *Kontextunsicherheit*, die das Fehlen von Einflüssen beschreibt, und der *Modellunsicherheit*, die die Ungenauigkeit der Zusammenhänge beschreibt.¹⁵³ Die Messunsicherheit gibt somit allgemein das Misstrauen in die Messung an.¹⁵⁴ Für ein bestehendes mathematisches Modell kann die

¹⁴⁹ Vgl. Heidenblut et al. (2007) S. 496.

¹⁵⁰ Vgl. Heidenblut et al. (2007) S. 496.

¹⁵¹ Vgl. Abkürzungsmerkmal aus Abschnitt 2.1.1.

¹⁵² In JCGM 100 (2008) wird die Messunsicherheit als Misstrauen der Messung bezeichnet.

¹⁵³ Vgl. Würtenberger (2018) S. 14.

¹⁵⁴ Vgl. JCGM 100 (2008) S. 2.

Messunsicherheit anhand der Wahrscheinlichkeitsdichte der einzelnen Parameter bestimmt werden. Hierzu wird mithilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung die Wahrscheinlichkeitsdichte für den Messwert ermittelt.¹⁵⁵ Die GUM liefert für die Berechnung Regeln, die von den verfügbaren Informationen über die Wahrscheinlichkeitsdichte der entsprechenden Parameter abhängen.¹⁵⁶ Für die Bildung des mathematischen Modells der Messung und der Identifikation der Parameter gibt es kein einheitliches Meta-Modell, aber verschiedene Hilfestellungen.¹⁵⁷

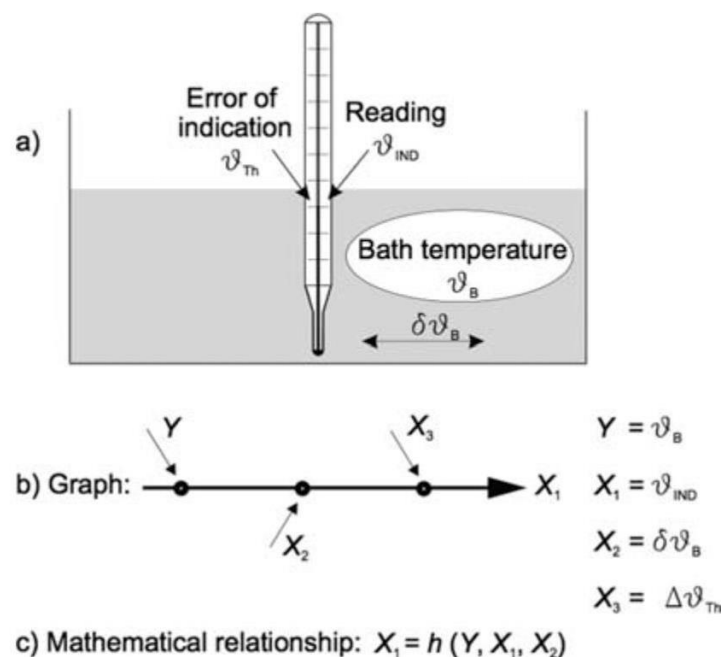


Abbildung 2.13: Darstellung des Messmodells am Beispiel einer Temperaturmessung; a) Darstellung der Topologie und Parameter; b) Graphische Darstellung des Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs; c) mathematische Darstellung des Modells der Messung.¹⁵⁸

2.4 Interpretation des Standes der Forschung

Die Sensorintegration kann als Weiterentwicklung eines bestehenden Systems betrachtet werden, mit dem Ziel, eine weitere Funktion zu erhalten, ohne dabei die bestehende Funktion zu verändern. Damit sind viele Anforderungen schon zu Beginn der Sensorintegration festgelegt. Für die Weiterentwicklung muss das bestehende System erst hinsichtlich der Messbarkeit der gewünschten Größe analysiert werden. Die Analyse erfolgt mit Modellen, die die notwendigen Zusammenhänge abbilden. Die Genauigkeit und die

¹⁵⁵ Vgl. Sommer, Siebert (2004) S.55.

¹⁵⁶ Vgl. JCGM 100 (2008) S. 10-18.

¹⁵⁷ Siehe Rossi et al. (2019), Sommer, Kessel (2014) und Giordani, Mari (2019).

¹⁵⁸ Bildquelle: Sommer (2009) S. 278.

Messunsicherheit des mathematischen Modells können als Bewertung herangezogen werden, jedoch muss für die Erstellung des mathematischen Modells die gesamte Gestalt inklusive des ausgewählten Sensors bekannt sein.

3 Forschungsdesign

In diesem Kapitel wird in Abschnitt 3.1 zuerst auf den identifizierten Forschungsbedarf eingegangen und die Forschungslücken genauer beschrieben. Anschließend werden in Abschnitt 3.2 die Forschungsfragen präsentiert und was aus der Beantwortung der Forschungsfrage geschlussfolgert werden kann. Den Abschluss bildet in Abschnitt 3.3 die Beschreibung des Forschungsvorgehens, mit welchen Schritten die Beantwortung der Forschungsfragen erreicht werden soll.

3.1 Forschungsbedarf

In Abschnitt 1.1 wurden der Bedarf an Industrie 4.0-Produkten und der Zusammenhang der Produktentwicklung aufgezeigt. Die Unterstützung bei der sensorischen Weiterentwicklung von Produkten fällt sehr unterschiedlich aus. Manche Unterstützungen sind sehr konkret mithilfe von Beispielen ausgeführt, wie zum Beispiel der Leitfaden des VDMA.¹⁵⁹ Andere Hilfsmittel dienen eher allgemein dem Vergleich von messtechnischen Systemen.¹⁶⁰ Für eine Minimierung des Entwicklungsrisikos sollten die Änderungen im Zuge einer Weiterentwicklung möglichst gering ausfallen.¹⁶¹ Häufig ist jedoch nicht klar, mit welchen Ersatzgrößen die gewünschten Informationen gewonnen werden können, ohne die ursprüngliche Funktion des Systems zu gefährden.

Die im Stand der Forschung vorgestellten Grundlagen und Hilfestellungen erfüllen den Bedarf an einer ausreichenden Unterstützung für das Finden und Bewerten von Ersatzgrößen nicht. Folgende Probleme sind bisher nicht behoben:

- Die bestehenden Hilfsmittel für die Integration von Sensoren unterstützen nur bei der Auswahl von Sensoren, nicht aber bei der Auswahl von Messgrößen, siehe Abschnitt 3.1.1.
- Die Hilfsmittel der Messtechnik zur Einschätzung von Mess- und Störgrößen setzen einen bekannten Sensor voraus, siehe Abschnitt 2.3.1 und 2.3.2.
- Es fehlt eine Modellbasis zur methodischen Identifikation und Auswahl von Ersatzgrößen, siehe Abschnitt 3.1.3.

3.1.1 Die bestehenden Hilfsmittel für die Integration von Sensoren unterstützen nur bei der Auswahl von Sensoren, nicht aber bei der Auswahl von Ersatzgrößen

Wie zu Beginn dieses Abschnittes gezeigt, gibt es Sensorkataloge, in denen Hilfestellung dazu gegeben werden, welcher Sensor für welche Messgröße in Frage kommt. Auch spezielle Leitfäden für das Nachrüsten von Maschinen bieten Hilfestellung bei der Auswahl

¹⁵⁹ Siehe Fleischer et al. (2018) S. 11.

¹⁶⁰ Vgl. JCGM 100 (2008).

¹⁶¹ Siehe Eckert et al. (2010) S. 1.

von Sensoren für einzelne Messgrößen, die für die Überwachung von Maschinen sinnvoll sein können.¹⁶² In FLEISCHER ET AL. wird darauf hingewiesen, dass es sinnvoll sei, lösungsneutral weitere Effekte zu suchen, die gemessen werden können.¹⁶³ Die Zuordnung der möglichen Sensoren zu den gewünschten Größen beinhaltet bereits eine indirekte Messung über alternative Messgrößen. Die Frage, wie diese alternativen Messgrößen identifiziert werden können, bleibt jedoch auch hier unbeantwortet. Je mehr Beispiele in diesen Leitfäden enthalten sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, einen geeigneten Sensor zur Messung der gewünschten Größe zu finden. Die Möglichkeit, sich vom Wettbewerber abzusetzen, wird dadurch jedoch geschmälert, da die in Leitfäden präsentierte Lösungen auch den Wettbewerbern zur Verfügung stehen. Existiert jedoch kein passendes Beispiel, kann der Leitfaden nicht benutzt werden und es liegt keine Hilfestellung bei der Suche nach alternativen Messgrößen vor.

3.1.2 Die Hilfsmittel der Messtechnik zur Einschätzung von Mess- und Störgrößen zielen auf spätere Phasen der Entwicklung von Messsystemen ab.

Die in Abschnitt 2.3 gezeigten Modelle der Messtechnik und das in Abschnitt 2.3.2 angesprochene Vorgehen dienen der Analyse und dem Vergleich von Messsystemen. Durch die Analyse von bestehenden Lösungen und Ideen entstehen immer wieder Ideen, die zu einer besseren Lösung führen können.¹⁶⁴ Die bestehenden Modelle der Messtechnik beschreiben Messsysteme jedoch in einem Entwicklungsstadium, in dem das Sensorprinzip bereits festgelegt worden ist. Für die gewünschte Analyse der Messunsicherheit mittels des Vorgehens der GUM muss die Unsicherheit der einzelnen Glieder der Messkette bereits bekannt sein.¹⁶⁵ Dies ist zu Beginn der Sensorintegration noch nicht bekannt, da zuerst eine passende Ersatzgröße gefunden werden muss, bevor ein Sensorprinzip ausgewählt werden kann. Auch das Vorgehen von HEIDENBLUT ET AL., das darauf abzielt, die Ursprünge der Unsicherheiten und mögliche Störgrößen zu identifizieren, benötigt bereits für ihre Analyse ein Sensorprinzip und eine vollständige Messkette.¹⁶⁶ So können diese Modelle und Vorgehen nicht für die systematische Identifikation möglicher Messgrößen in der Konzeptphase verwendet werden, da bereits mehr Informationen vorliegen müssen, als zu Beginn der sensorischen Weiterentwicklung zur Verfügung stehen. Alternativ können alle Ideen so weit konkretisiert werden, dass eine Aussage über die Messunsicherheit der Messgrößen und Sensorkombination möglich ist. Dies hat jedoch einen erhöhten Aufwand zur Folge, da mehrere Entwicklungen parallel getätigt werden.

¹⁶² Siehe Fleischer et al. (2018) S. 11.

¹⁶³ Siehe Fleischer et al. (2018) S. 6.

¹⁶⁴ VDI 2221 (2018) S. 9.

¹⁶⁵ JCGM 100 (2008) S. 18ff.

¹⁶⁶ Heidenblut et al. (2007).

3.1.3 Es fehlt eine Modellbasis zur methodischen Identifikation und Auswahl von Ersatzgrößen.

Die fehlende Hilfestellung bei der Suche nach möglichen Ersatzgrößen lässt sich auf den Mangel an geeigneten Analysemodellen zurückführen. Das C&C²-Modell dient zur Identifikation des Zusammenhangs zwischen der Funktion eines Systems und dessen Gestalt. Da viele Größen eines Systems mit der Kraftleitungsfunktion dieses Systems zusammenhängen, kann mithilfe des C&C²-Ansatzes ein C&C²-Modell gebildet werden, mit dem die Gestalt, die mit der entsprechenden Funktion zusammenhängt, analysiert werden. Hierbei können jedoch keine Reaktionseffekte, die infolge von *Umformen*¹⁶⁷ und *Wandeln*¹⁶⁸ der Größen, die durch die Leitstützstruktur geleitet werden, entstehen, dargestellt werden. Dies hat zur Folge, dass Messgrößen, die aufgrund der Reaktion entstehen, nicht gezielt identifiziert werden können. Auch das Wirkraummodell, das als zusätzliches Modell auf Basis des C&C²-Ansatzes entstanden ist, kann die Wandlung und Umformung der geleiteteten Größen nicht abbilden.

3.2 Forschungsfragen

Für das Schließen der Forschungslücke ergeben sich folgende Forschungsfragen:

1. Wie kann der C&C²-Ansatz zur systematischen Suche von Ersatzgrößen verwendet werden?
2. Wie können Störgrößen, die durch die Verwendung des bestehenden Systems als Sensor entstehen, erkannt werden?
3. Wie muss der C&C²-Ansatz erweitert werden, um auch sekundäre Reaktionen als Ersatzgrößen identifizieren zu können?
4. Wie kann das Lastpfad- und Knotenmodell für die Bewertung von Ersatzgrößen angewendet werden?
5. Wie steigert die Kenntnis über das Lastpfad- und Knotenmodell die Analysefähigkeit?

Die erste Forschungsfrage zielt darauf ab, die Zusammenhänge der Größe, deren Ermittlung das Ziel der sensorischen Weiterentwicklung des Systems ist, und den tatsächlich gemessenen Größen herzustellen. Die zweite Forschungsfrage adressiert die für eine Messung unabdingbare Berücksichtigung aller notwendigen Parameter. Die dritte Forschungsfrage zielt darauf ab, die fehlenden Elemente für die Berücksichtigung sekundärer Effekte zu identifizieren. Die vierte Forschungsfrage überprüft die Anwendbarkeit der Weiterentwicklung des C&C-Ansatzes. Die fünfte Forschungsfrage untersucht die Wirksamkeit der Weiterentwicklung des C&C-Ansatzes.

¹⁶⁷ Nach Roth (2000) S.82.

¹⁶⁸ Nach Roth (2000) S.82.

3.3 Forschungsvorgehen

Für die Beantwortung der ersten Forschungsfrage werden in Abschnitt 4.1 die Begriffe Ziel-, Ersatz- und Messgröße definiert und erklärt. Anschließend wird in Abschnitt 4.2.1 geprüft, wie der Zusammenhang zwischen der Zielgröße, den funktionsrelevanten und den veränderlichen Parametern des bestehenden Systems hergestellt werden kann. Die Frage gilt als beantwortet, wenn ein systematischer Zusammenhang zwischen Ziel- und Ersatzgröße gefunden ist.

Für die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage wird in Abschnitt 4.2.2 erörtert, wie die für eine Messung relevanten Parameter identifiziert werden können. Anschließend wird in Abschnitt 4.2.3 geprüft, wie der Einfluss von Störgrößen, die durch die Schwankung der Werte der funktionsrelevanten Parameter entstehen, berücksichtigt werden können. In Abschnitt 4.2.4 wird geprüft, wie Störgrößen, die aus parallelen Lastpfaden entstehen, im C&C²-Modell berücksichtigt werden können. Die Frage gilt als beantwortet, wenn eine Möglichkeit gefunden wird, wie die Störgrößen aus dem C&C²-Modell abgeleitet werden können.

Für die Beantwortung der dritten Forschungsfrage wird in Abschnitt 4.2.5 überprüft, welche Reaktionen infolge von Umformen und Wandeln auftreten können und wie diese innerhalb eines C&C²-Modells abgebildet werden können. Anschließend wird in Abschnitt 4.3 ein Modell vorgestellt, das den C&C²-Ansatz um die notwendigen Elemente erweitert. Für die Beantwortung der vierten Forschungsfrage wird das neu vorgestellte Modell in Kapitel 0 auf zwei reale bekannte Fragestellungen angewendet und geprüft, ob die Ergebnisse aus der Analyse mittels Lastpfad- und Knotenmodell mit den tatsächlichen Ergebnissen der vorgestellten Patente übereinstimmen. Die Frage gilt als beantwortet, wenn Bewertungskriterien gefunden werden, anhand derer Priorisierungen durchgeführt werden können.

Für die Beantwortung der fünften Forschungsfrage wird in Kapitel 1 eine Probandenstudie durchgeführt und ausgewertet, in der die Bewertung der Auswahl von möglichen Ersatzgrößen vor und nach der Vermittlung des Lastpfad- und Knotenmodells verglichen wird. Die Frage gilt als beantwortet, wenn eine Aussage über die Steigerung der Analysefähigkeit infolge der Modellverwendung getroffen werden kann.

4 Zentrale Modelle der Arbeit

Aus dem Forschungsbedarf geht hervor, dass zur Abbildung von Ersatzgrößen im Kontext der sensorischen Weiterentwicklung von Produkten ein Analysemodell benötigt wird. Die Anforderungen an das Modell können wie folgt zusammengefasst werden:

- Darstellung und Beschreibung von Reaktionsgrößen infolge der gewünschten Größe.
- Darstellung und Beschreibung möglicher Messstellen und Ersatzgrößen für die Messung der gewünschten Größe.
- Darstellung und Beschreibung der für die Messung zu berücksichtigen Parameter.

4.1 Unterscheidung von Ziel-, Ersatz- und Messgröße

Produkte müssen, um erfolgreich zu sein, den geforderten KundenInnennutzen erfüllen.¹⁶⁹ Die KundInnen entscheiden anhand der Eigenschaften, ob ihre Anforderungen erfüllt sind. Die Aufgabe der ProduktentwicklerIn ist die Bereitstellung der geforderten Eigenschaften anhand der richtigen Merkmale. Da Produkte aus verschiedenen Modulen zusammengesetzt werden,¹⁷⁰ handelt es sich hierbei um Systeme, die Teil eines Supersystems sind und ebenfalls aus Subsystemen bestehen.¹⁷¹ Diese hierarchische Struktur sorgt dafür, dass jede EntwicklerIn eines Systems die KundIn einer Subsystem-EntwicklerIn ist und die geforderten Eigenschaften anhand der Verknüpfung von Merkmalen realisieren muss, die sie als Zieleigenschaften ihrer Subsystem-EntwicklerIn weitergibt. Für die Verdeutlichung wird Abbildung 4.1 betrachtet: Die EntwicklerIn einer Fabrik muss die ihr verfügbaren Elementen so miteinander verknüpfen, dass die Anforderungen an die Fabrik erfüllt werden. Die Erfüllung der Anforderungen wird an den Eigenschaften der Fabrik geprüft. Die zur Verfügung stehenden Elemente bilden somit die Merkmale der Fabrik. Die Produkteigenschaften der Maschinen sind jedoch die Anforderungen, die an die MaschinenentwicklerIn gestellt werden. Diese Soll-Eigenschaften der Maschine erfüllt die MaschinenentwicklerIn durch die Auswahl und Verknüpfung von Modulen oder Baugruppen, die für sie die Elemente bilden. So entsteht eine hierarchische Verkettung von Subsystemen: Die notwendigen Merkmale zur Erreichung der gewünschten Eigenschaften werden als notwendige Eigenschaften für die EntwicklerIn des Subsystems formuliert.

¹⁶⁹ Vgl. FELDHUSEN, GROTE (2013) S. 26.

¹⁷⁰ Vgl. Pahl et al. (2007) S.684-S. 686.

¹⁷¹ Vgl. ROPOHL (1975) S. 76.

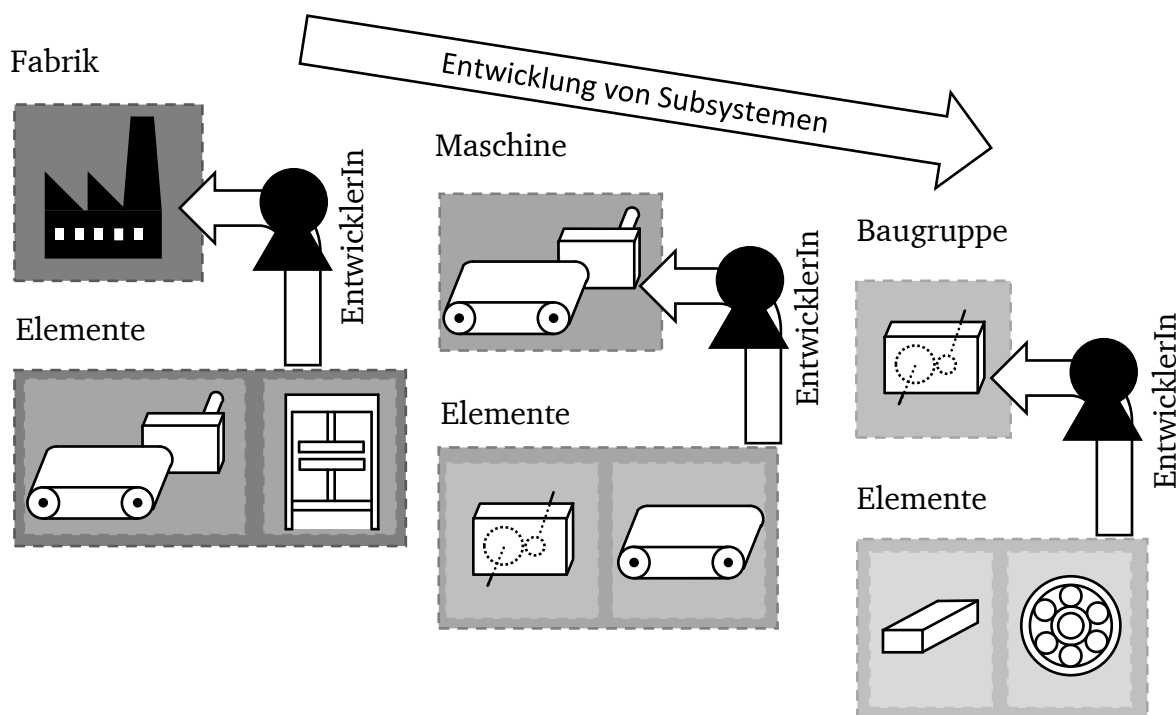


Abbildung 4.1: Darstellung der Hierarchie von Entwicklungszielen am Beispiel einer Fabrik.

Bei der sensorischen Weiterentwicklung steht die Erfassung von Größen, die mit der Funktion des Systems verknüpft sind, im Vordergrund. Hierbei kann es sich um Prozess- oder Zustandsgrößen handeln. Je nach Ebene in der Hierarchie oder Verfügbarkeit von Technologien stehen der EntwicklerIn unterschiedliche Lösungen zur Verfügung. Anhand der Kenntnis des Systems werden Anforderungen formuliert, welche Größe gemessen werden muss, damit die gewünschte Information gewonnen werden kann. Um in diesem Zusammenhang Klarheit zu schaffen, werden in Anlehnung an den Zusammenhang von *Merkmale* und *Eigenschaften* Begriffe definiert. GWOSCH führt die Begriffe *Entwicklungs-* und *Konstruktionszielgröße* ein, um die Ziele der Entwicklung und die Ziele der Konstruktion hervorzuheben.¹⁷² In diesem Sinne wird die Größe, deren Erfassung die Aufgabe ist, als Messzielgröße bezeichnet. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit in der Bewertung von Messmöglichkeiten liegt, wird zur sprachlichen Einfachheit auf die Vorsilbe *Mess-* verzichtet:

Zielgröße:

Als Zielgröße wird die Zustands- oder Prozessgröße bezeichnet, deren Erfassung das Ziel der sensorischen Weiterentwicklung ist.

¹⁷² Gwosch (2019) S. XXXV.

Die Messung oder Beschreibung aller anderen Größen dient nur der Bestimmung der Zielgröße. Die Zielgröße ist der Ausgangspunkt der sensorischen Weiterentwicklung. Aufbauend auf WEBER¹⁷³ und der Unterscheidung von Merkmalen und Eigenschaften dienen die ersatzweise gemessenen Größen nur dem Zweck, einen Rückschluss auf die Zielgröße zu ermöglichen. Daher wird folgender Begriff definiert:

Ersatzgröße:

Als Ersatzgröße wird eine Größe bezeichnet, deren Erfassung Rückschlüsse auf die Zielgröße ermöglicht.

Diese Zuordnung muss nicht zwingend eindeutig sein. Oftmals wird die Eindeutigkeit durch die Verwendung mehrerer Ersatzgrößen erzielt. Der Zusammenhang der Ziel- und der Ersatzgrößen entsteht durch die physikalischen Zusammenhänge im technischen System.

Zusätzlich wird als Abgrenzung zur Ersatzgröße, die durch die physikalischen Zusammenhänge im Produkt bestimmt wird, die Definition der Messgröße im Rahmen dieser Arbeit eingeschränkt:

Messgröße:

Die Messgröße bezeichnet die Eingangsgröße in einen Sensor. Sie beschreibt damit die Größe, die ohne Umwege direkt gemessen wird.

Die verfügbaren Messgrößen können aufgrund von Randbedingungen, wie zum Beispiel aufgrund von Ausschluss von Sensortechnologien, begrenzt sein.

In DIN 1319-1 wird die Messgröße als die Größe, der die Messung gilt, definiert.¹⁷⁴ Diese Beschreibung entspricht in dieser Arbeit der Definition der Zielgröße. Des Weiteren wird die Messgröße auch als die Größe, die gemessen wird, bezeichnet.¹⁷⁵ Dies entspricht in dieser Arbeit der Definition der Ersatzgröße. Die in dieser Arbeit gewählten Definitionen stehen damit nicht im Widerspruch zu den gängigen Definitionen innerhalb der Metrologie, da die Messgröße, je nach Verfügbarkeit von Sensorik, die Zielgröße oder auch die Ersatzgröße sein kann.

Diese strenge Unterscheidung der Begriffe wird nötig, um mittels *Zielgröße* die Aufgabe klar zu skizzieren, anhand von Katalogen die möglichen *Messgrößen* vorzugeben und das technische System mittels *Ersatzgrößen* beschreiben zu können. Die Überschneidung von Messgrößen und Ersatzgrößen liefert die verfügbaren Lösungen für die Messung der

¹⁷³ Weber (2012).

¹⁷⁴ Vgl. DIN 1319-1 (1995) S. 2.

¹⁷⁵ Vgl. DIN 1319-1 (1995) S. 2.

Zielgröße. Abbildung 4.2 verdeutlicht den Zusammenhang von Ziel-, Ersatz- und Messgrößen. Die Gestalt des Systems gibt vor, welche Ersatzgrößen für eine Messung der Zielgröße in Frage kommen. Die aktuell verfügbaren Sensoren können bei der Recherche in allgemeinen Sensorkatalogen oder direkt beim Hersteller gefunden werden. Besteht eine Überlappung von Ersatz- und Messgröße, indem für die Ersatzgröße ein Sensor mit der gleichen Messgröße vorliegt, entsteht ein Lösungsraum für die Sensorintegration. Existiert kein Sensor mit der passenden Messgröße, in Abbildung 4.2 Ersatzgröße 1 und 4, besteht keine Möglichkeit, die Zielgröße über diese Ersatzgröße zu bestimmen. Eine weitere Betrachtung dieser Ersatzgröße ergibt nur dann Sinn, wenn die Entwicklung eines Sensors für diese spezielle Messgröße angestrebt wird. Das Gleiche gilt für verfügbare Messgrößen, für die keine passende Ersatzgröße vorliegt. In Abbildung 4.2 gilt das für Messgröße 3. Somit kann der Sensor mit dieser Messgröße, sofern nicht die Absicht besteht, das System konstruktiv anzupassen, um die passende Ersatzgröße bereitzustellen, verworfen werden.

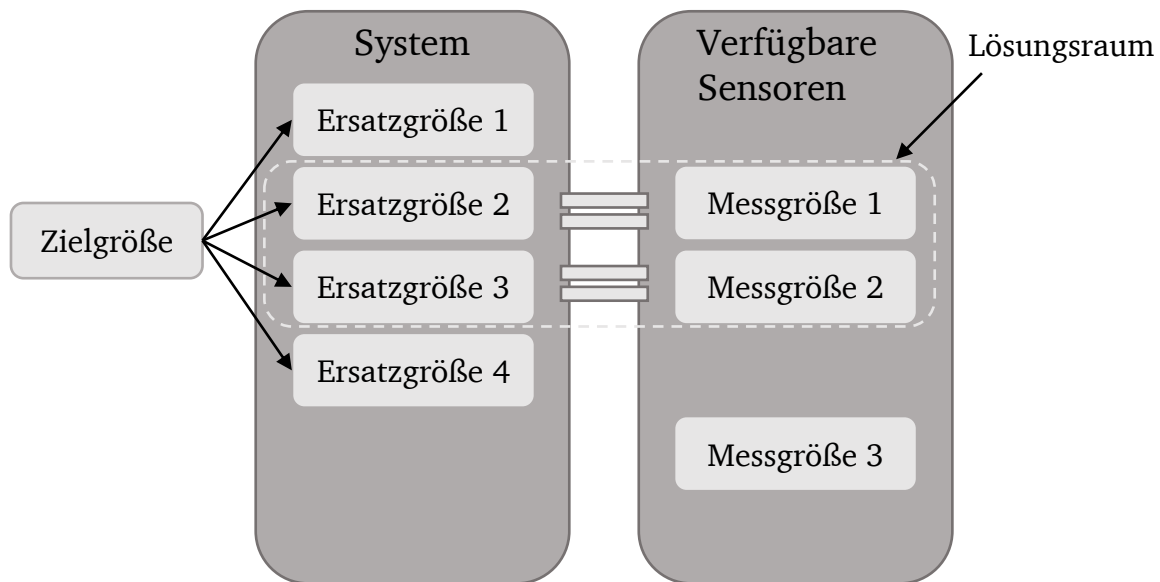


Abbildung 4.2: Zusammenhang von Ziel-, Ersatz- und Messgröße.

Wie Abschnitt 2.1.2 gezeigt hat, besteht das System *Produkt* aus vielen Subsystemen. Die beeinflussbaren Parameter (Merkmale) und die daraus resultierenden Eigenschaften können je nach Hierarchie innerhalb des Super- und Subsystemverhältnis variieren. Dadurch kann die Festlegung der Zielgröße für dieselbe Gesamtaufgabe variieren. So kann, wie in Abbildung 4.3 gezeigt, eine Ersatzgröße für eine Zielgröße des Systems bei der Entwicklung des Subsystems zu einer Zielgröße werden, für die im Subsystem eine Ersatzgröße gefunden werden muss. Die Ersatzgrößen können als Anforderungen und damit neue Zielgrößen an Hersteller oder LieferantInnen der Subsysteme weitergegeben werden und werden damit zu Zielgrößen. Alternativ kann aber auch, anstatt der Weitergabe an Hersteller oder LieferantInnen, eine andere Ersatzgröße gefunden werden, für die ein Sensor zur Verfügung steht. Jedoch ist es für eine LieferantIn von Sensoren deutlich schwieriger zu sagen, wie mittels einer Messgröße die Zielgröße ermittelt werden kann.

Dies kann zum Beispiel in Form von Katalogen, wie in FLEISCHER ET AL. präsentiert,¹⁷⁶ erfolgen, in denen bereits bekannte Zusammenhänge von Ziel- und Messgrößen festgehalten werden.

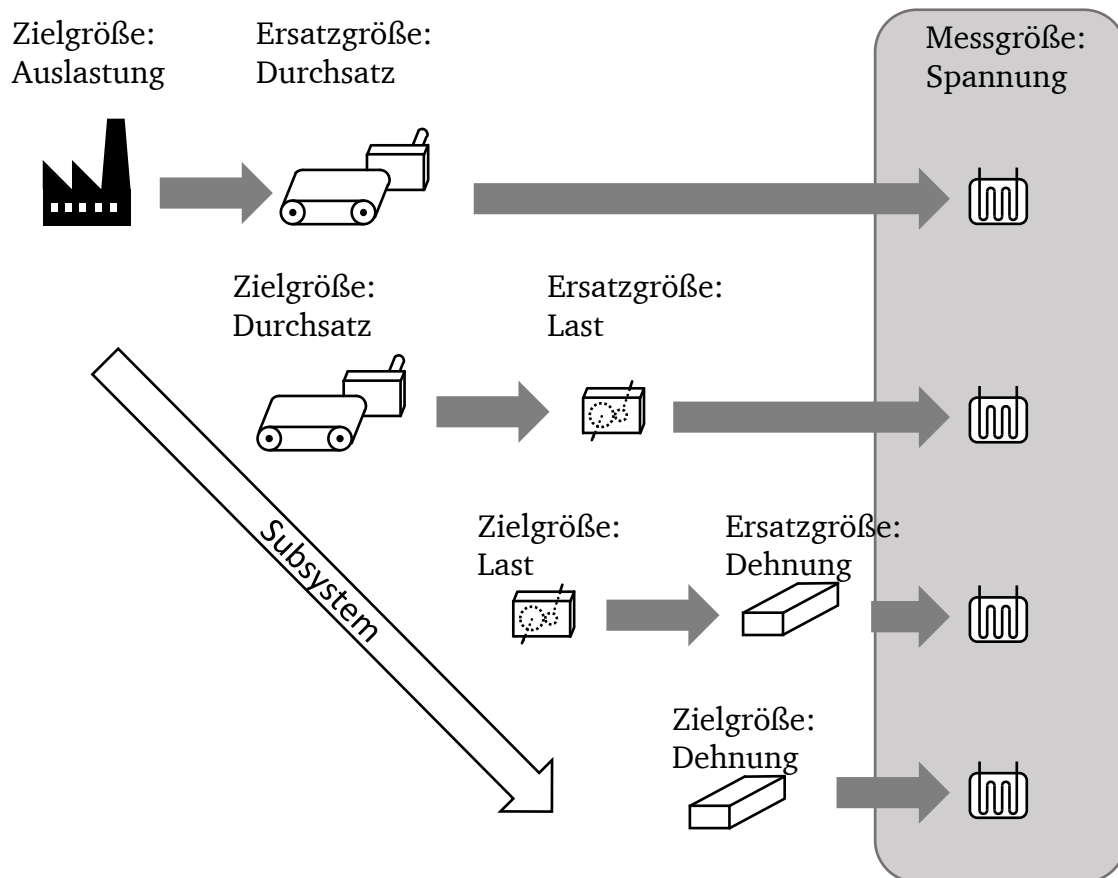


Abbildung 4.3: Weitergabe von Ersatzgrößen als Zielgrößen für die LieferantInnen der Subsysteme.

4.2 Erweiterung des C&C²-Ansatzes für die Bestimmung von Ersatzgrößen

Der Zweck des C&C²-Ansatzes liegt darin, den Zusammenhang der Gestalt und der Funktion von Bauteilen und Produkten zu beschreiben. VOGEL UND KIRCHNER konnten zeigen, dass Zielgrößen anhand von Reaktionen, die bei der Funktionserfüllung von Produkten auftreten, gemessen werden können.¹⁷⁷ Für die Identifikation möglicher Messstellen und entsprechender Ersatzgrößen kann die Modellierung mithilfe des C&C²-Ansatzes hilfreich sein, denn die Zielgrößen in technischen Systemen hängen häufig mit der Funktionserfüllung der Systeme zusammen. Dies soll im Folgenden diskutiert werden.

Das C&C²-Modell liefert Parameter und Gestaltelemente, die für die Funktionserfüllung relevant sind. Da eine Funktionserfüllung mit einer Reaktion einhergeht, liegt es nahe, an den funktionsrelevanten Gestaltelementen nach Parametern zu suchen, die als

¹⁷⁶ Siehe Fleischer et al. (2018) S. 11.

¹⁷⁷ Siehe Vogel, Kirchner (2019) S. 3717.

Ersatzgröße für die geleitete Zielgröße verwendet werden können. Abbildung 4.5 zeigt einen Getriebemotor, einen Ausschnitt aus der Funktionsstruktur und das C&C²-Modell für die Unterfunktion *Umformen*. Die primäre Funktion *elektrische Energie in mechanische, rotative Energie wandeln* wird in die allgemeinen Funktionen¹⁷⁸ nach ROTH geteilt. Weitere Funktionen wie zum Beispiel *Entstehende Wärme abführen*, *Schmierung sicherstellen* und *Reaktionskräfte aufnehmen* sind zur Übersicht ausgeblendet. Die Unterfunktion *Umformen* wird durch die im unteren Teil gezeigte Zahnradpaarung und die Ausgangswelle des Getriebes realisiert. Anhand des C&C²-Modells können die funktionsrelevanten Gestaltelemente direkt identifiziert werden, ohne die Ebene Effekte und Wirkprinzipien abbilden zu müssen. Dies ist möglich, da der Zusammenhang der Funktion und der Gestalt bereits bekannt ist und keine Zwischenmodelle benötigt.

Das Drehmoment T_E von der Eingangswelle wird in das Ritzel geleitet und dort in eine exzentrisch angreifende tangentielle Kraft F_{Zahn} umgeformt. Diese Kraft wird vom Zahnrad in Drehmoment T_A umgeformt und von der Ausgangswelle an den Ausgang des Getriebes geleitet.

In der Darstellung des C&C²-Modells der Funktion *Umformen* ist ein Lastpfad für das übertragene Drehmoment rot hervorgehoben. Innerhalb des Lastpfades des Drehmoments liegen Gestaltelemente, an denen Ersatzgrößen gefunden werden können. In Versuchen am pmd konnte gezeigt werden, dass die Zielgröße auch anhand von Ersatzgrößen messbar ist, die nicht Teil des Lastpfades der Zielgröße sind, Abbildung 4.4. In Abbildung 4.4 wird deutlich, dass die elektrische Impedanz des gemessenen Lagers abhängig des übertragenen Drehmoments ist und somit als Ersatzgröße für die Messung des Drehmoments zur Verfügung steht. In Abbildung 4.5 zeigt sich jedoch, dass der Messort am Lager und damit die Eigenschaften des Lagers nicht direkt im Lastpfad des geleiteten Drehmoments liegt, sondern in einem anderen Lastpfad des C&C²-Modells der Funktion *Umformen* zu finden ist. In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, welche Erweiterungen notwendig sind, um auch weitere Eigenschaften innerhalb des C&C²-Modells zu identifizieren, die als Ersatzgröße zur Verfügung stehen, aber nicht im Lastpfad der Zielgröße liegen.

¹⁷⁸ Nach Roth (2000) S. 83.

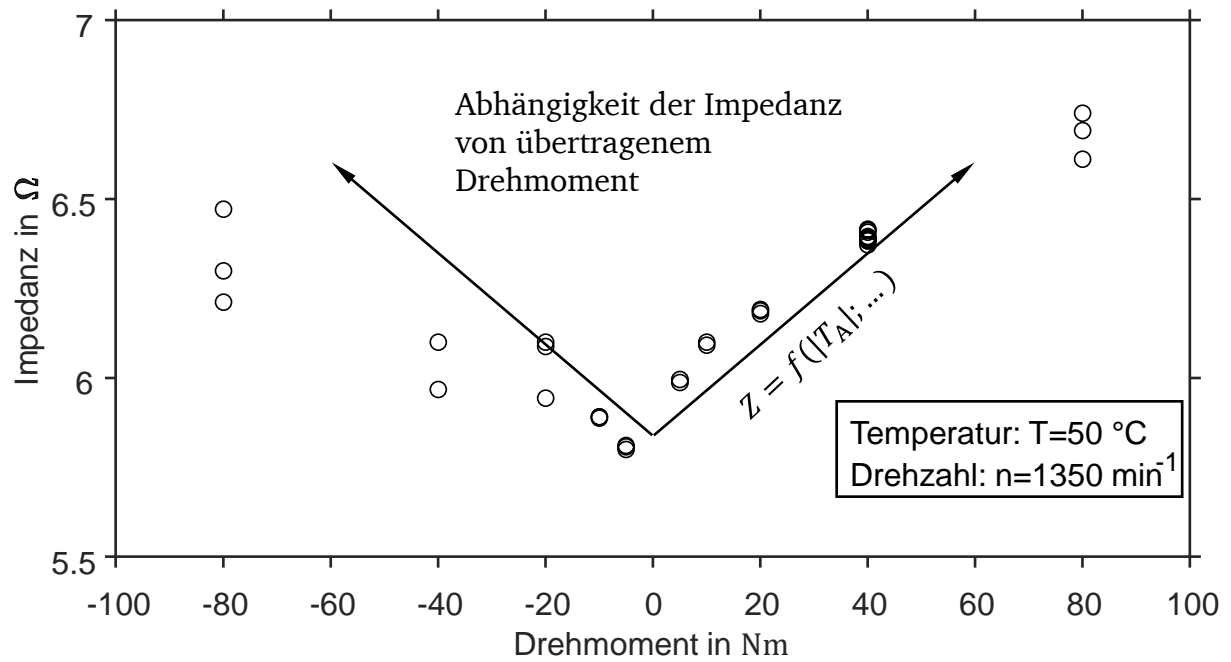


Abbildung 4.4: Versuchsergebnisse zur Untersuchung der Abhängigkeit der elektrischen Lagerimpedanz von übertragenem Drehmoment in einem Industriegetriebe.

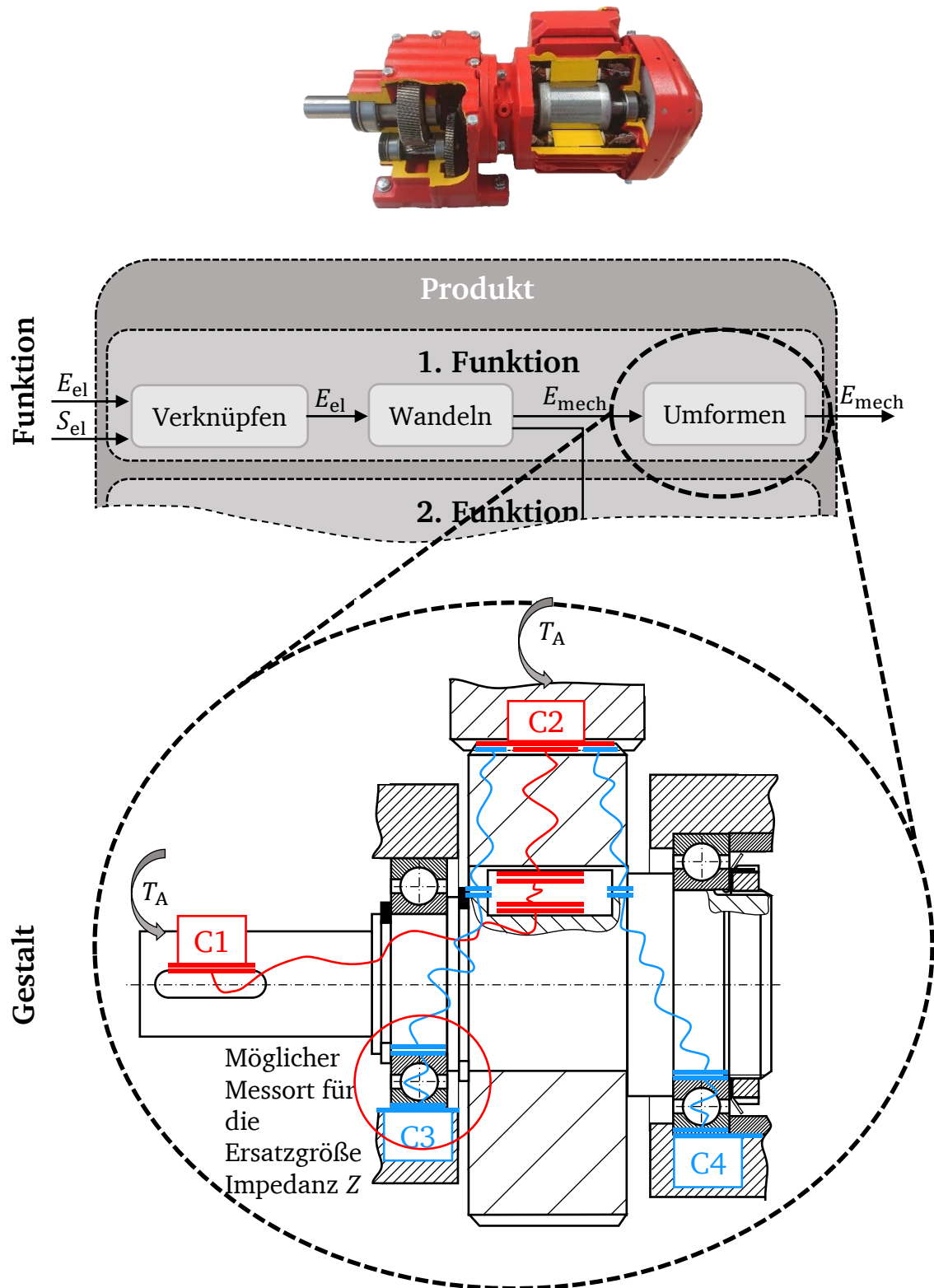


Abbildung 4.5: Zusammenhang der Funktion und der Gestalt eines Getriebemotors. Oben: Abbildung des Getriebemotors. Mitte: Ausschnitt der Funktionsstruktur des Getriebemotors. Unten: C&C²-Modell der Funktion *Umformen*. Rot: Hervorhebung eines Lastpfades des Drehmomentes. Blau: Weitere Lastpfade innerhalb des C&C²-Modells.

4.2.1 Identifikation von Messstellen und Ersatzgrößen

An der Funktionserfüllung der Funktion *Umformung und Leitung des Drehmoments* sind die in Abbildung 4.5 dargestellten Wirkflächenpaare WFP_1 , WFP_2 , WFP_3 und WFP_4 und die Leitstützstrukturen LSS_1 , LSS_2 und LSS_3 beteiligt. An den beteiligten Wirkflächenpaaren kann nach Eigenschaften gesucht werden, die infolge der Leitung der Zielgröße eine Änderung erfahren, denn jede Aktion hat eine Reaktion zur Folge. Abbildung 4.6 zeigt ein allgemeines Wirkflächenpaar und eine Auflistung möglicher Oberflächeneigenschaften, die eine Änderung infolge der Funktionserfüllung erfahren.

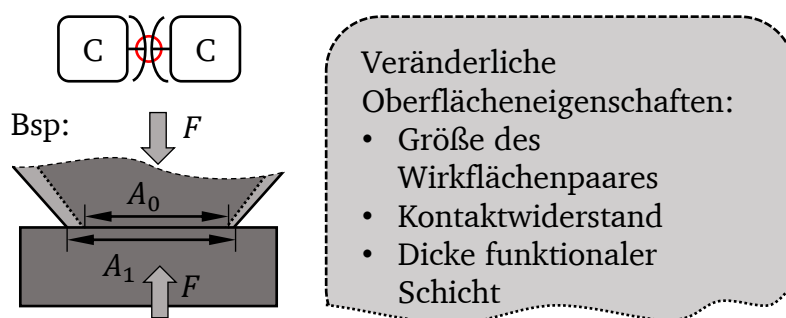


Abbildung 4.6: Veränderliche Oberflächeneigenschaften. Links: Vergrößerung des Wirkflächenpaares aufgrund der Kraftübertragung; Rechts: Auszug aus der Auflistung der veränderlichen Oberflächeneigenschaften.

Die Auswahl an Eigenschaften des Wirkflächenpaares, die eine Änderung infolge der Funktionserfüllung erfahren und deren Änderung damit die Möglichkeit der Erfassung der Zielgröße bietet, ist nicht durch die Auswahl an funktionsrelevanten Eigenschaften beschränkt. Stattdessen bilden die funktionsrelevanten und die veränderlichen Eigenschaften jeweils eine eigene unabhängige, nicht exklusive Menge an Eigenschaften.

So befindet sich die in Abbildung 4.6 gezeigte veränderliche Oberflächeneigenschaft *Größe des Wirkflächenpaares* A_i in der Menge der funktionsrelevanten Eigenschaften und in der Menge der veränderlichen Eigenschaften. Für die Funktionserfüllung ist die *Größe der Fläche* A_i relevant, da eine zu kleine Fläche zu einer zu großen Flächenpressung führt und die Oberflächen der Bauteile beschädigt werden können. Diese Fläche erfährt jedoch auch, wie in Abbildung 4.6 gezeigt, eine Änderung infolge der Kraftübertragung und wächst beim Anlegen einer Last von A_0 auf A_1 . Dieses Verhalten kann theoretisch bei der Bestimmung von Lagerlasten genutzt werden, da eine Hertzsche Fläche vorliegt.¹⁷⁹

Das Wirkflächenpaar kann auch getrennt und ein passender Sensor integriert werden. Doch Abbildung 4.7 zeigt deutlich, dass durch den zusätzlichen Sensor, das Wirkflächenpaar WFP_1 wegfällt und zwei neue Wirkflächenpaare WFP_2 und WFP_3 entstehen. Außerdem entsteht eine zusätzliche Leitstützstruktur LSS_1 . Die Änderung an den funktionsrelevanten Gestaltelementen führt damit zu einem veränderten Verhalten des Systems. BRECHER ET AL. zeigen das veränderte Verhalten infolge zusätzlicher Gestaltelemente an

¹⁷⁹ Schirra et al. (2018) S. 3020.

Schraubenverbindungen, indem sie das Verhalten von Sensorschrauben und Schrauben mit einem zusätzlichen Sensor zwischen Schraubenkopf und verspannten Bauteilen vergleichen.¹⁸⁰ Auch TLUSTY, ANDREWS zeigen bei der Untersuchung von Sensoren für die Überwachung von Fertigungsmaschinen, dass zusätzliche Sensoren das Systemverhalten verändern.¹⁸¹ Diese beiden Untersuchungen bestätigen die erwartete Veränderung des Systemverhaltens beim Entstehen von neuen, funktionsrelevanten Gestaltelementen.

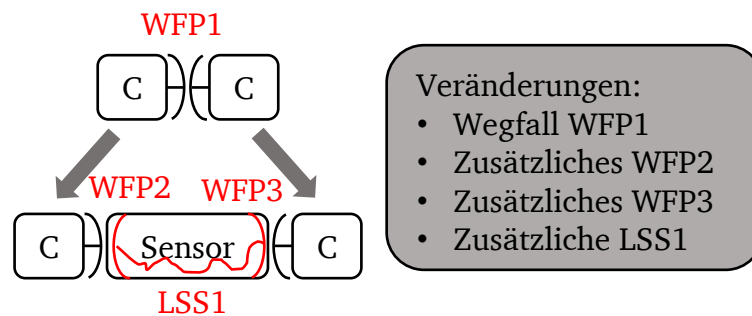


Abbildung 4.7: Sensor zwischen Wirkflächen eines Wirkflächenpaars.

Auch veränderliche Volumeneigenschaften können als Ersatzgröße genutzt werden. Abbildung 4.8 zeigt eine beispielhafte Auflistung veränderlicher Volumeneigenschaften einer Leitstützstruktur.

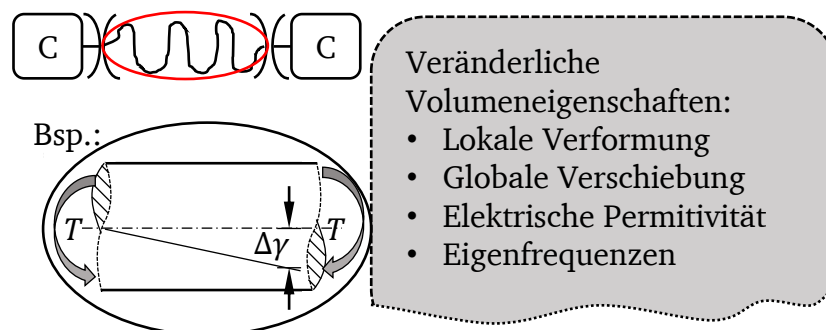


Abbildung 4.8: Veränderliche Volumeneigenschaften. Links: Verwindung der Leitstützstruktur infolge der Momentenübertragung; Rechts: Auszug aus der Auflistung der veränderlichen Volumeneigenschaften.

Wie bereits für die veränderlichen Oberflächeneigenschaften erklärt, können auch veränderliche Volumeneigenschaften als Ersatzgröße herangezogen werden. Auch hier gilt, dass die funktionsrelevanten und die veränderlichen Volumeneigenschaften jeweils eine unabhängige, nicht exklusive Menge an Eigenschaften bilden. So kann die in Abbildung 4.8 gezeigte veränderliche Volumeneigenschaft *Globale Verschiebung* $\Delta\gamma$ genutzt werden, um auf das übertragene Moment zu schließen. Hierbei stellt die Volumeneigenschaft

¹⁸⁰ Siehe Brecher et al. (2016).

¹⁸¹ Tlusty, Andrews (1983) S. 566-567.

globale Verschiebung keine funktionsrelevante Eigenschaft dar, wird aber selbst von den funktionsrelevanten Volumeneigenschaft *Steifigkeit* beeinflusst. Im Gegensatz dazu ist die elektrische Permittivität eines Schmierstoffes in Wälzlagern eine veränderliche Eigenschaft infolge der Last,¹⁸² wird jedoch nicht von funktionsrelevanten Eigenschaften beeinflusst.

Durch die Messung einer oder mehrerer veränderlicher Eigenschaften als Ersatzgrößen wird die Komponente, deren Leitstützstruktur verwendet wird, zu einer sensorischen Komponente weiterentwickelt.¹⁸³

Die Weiterentwicklung einer bestehenden Komponente hin zu einer sensorischen Komponente kann in manchen Fällen entscheidend für den Erfolg sein, da, wie in Abbildung 4.9 gezeigt, auch der Austausch einer Komponente durch eine verfügbare sensorische Komponente die Funktion des Produktes beeinflussen kann. Wenn die funktionsrelevanten Eigenschaften der Leitstützstruktur LSS_2 der neuen Komponente sich von den funktionsrelevanten Eigenschaften der alten Komponente LSS_1 unterscheiden, kommt es zu einer Änderung der Primärfunktionsgestalt und die ursprüngliche Funktion des Systems ist nicht mehr gewährleistet. Dies hat zur Folge, dass die Funktionserfüllung der neuen Primärfunktionsgestalt erneut überprüft werden muss.

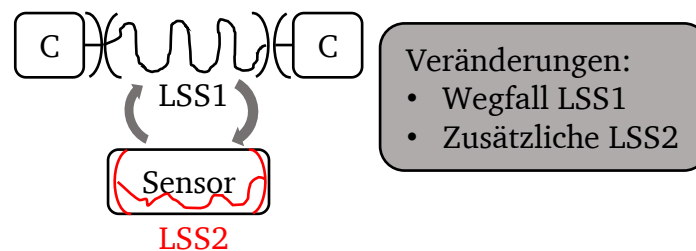


Abbildung 4.9: Veränderungen bei Austausch einer Komponente.

4.2.2 Identifikation der zu berücksichtigenden Parameter

Für die Bestimmung der Zielgröße S_{Ziel} anhand der Messung einer Ersatzgröße S_{Ersatz} wird ein Berechnungsmodell benötigt, das den mathematischen Zusammenhang der beiden Größen quantifiziert.¹⁸⁴ Die Übertragungsfunktion, die das Verhältnis zwischen Mess- und Zielgröße bildet, ist eine Funktion der Einflussparameter, siehe Gl. (4.1). Nicht berücksichtigte Parameter oder eine Vereinfachung des funktionellen Zusammenhangs führen zu Unsicherheit bezüglich des mathematischen Modells und damit zu Messunsicherheit.¹⁸⁵

$$\frac{S_{\text{Ersatz}}}{S_{\text{Ziel}}} = f(\text{Einflussparameter}) \quad (4.1)$$

¹⁸² Siehe Furtmann (2017) S. 109.

¹⁸³ Vgl. Martin et al. (2018b).

¹⁸⁴ Heidenblut et al. (2007) S. 501.

¹⁸⁵ Sommer (2009) S. 292.

Da die Leitung der Zielgröße über die Gestaltelemente erfolgt, kann die Kenntnis über die Gestalt bei der Bildung des mathematischen Modells genutzt werden:

$$\frac{S_{\text{Ersatz}}}{S_{\text{Ziel}}} = f(WFP_i; LSS_i) \quad (4.2)$$

Abbildung 4.10 zeigt in der oberen Hälfte das bereits bekannte C&C²-Modell für die Funktion *Energie leiten* in einer Getriebewelle. Durch die Festlegung, die Änderung der Eigenschaft *Dehnung der LSS₁*, die durch die Welle zur Passfeder führt, zu messen, entsteht eine weitere Funktion *mechanisches Signal leiten*. Das C&C²-Modell der Funktion *mechanisches Signal leiten* ist in der unteren Hälfte von Abbildung 4.10 eingetragen. Zur Übersicht werden die Leitstützstrukturen der Funktionen *Energie leiten* und *Signal leiten* untereinander eingetragen, tatsächlich ist ein Teil der Gestaltelemente identisch. Die Übertragungsfunktion von der Ziel- zur Messgröße wird durch die Einflussparameter, die sich aus den funktionsrelevanten Parametern der Funktion *mechanisches Signal leiten* ergeben, bestimmt. Diese funktionsrelevanten Parameter können wieder anhand des Gestalt-Funktionszusammenhangs in den Wirkflächenpaaren WFP_1, WFP_2 und der Leitstützstruktur LSS_1 der Funktion gefunden werden:

$$\frac{S_{\text{Ersatz}}}{S_{\text{Ziel}}} = f(WFP_1; LSS_1; WFP_2) \quad (4.3)$$

In Abbildung 4.10 ist der Sensor am Umfang der Welle angebracht und misst die Dehnung ε infolge der Torsionsspannung. Der Zusammenhang zwischen Drehmoment T_A und der Torsionsspannung τ an der Oberfläche einer kreiszylindrischen Welle ist abhängig vom Radius r der Welle und ist aus der technischen Mechanik bekannt:

$$\tau = \frac{T_A}{\pi r^2} \quad (4.4)$$

Anhand des Hook'schen Gesetzes kann für den rein elastischen Bereich auch der Zusammenhang von Spannung τ und der Dehnung ε mithilfe des Schubmoduls G_{Stahl} für das verwendete Material hergestellt werden. Somit ergibt sich das mathematische Modell der Auswertung für die Bestimmung des Drehmoments T_A anhand der Messung der Dehnung ε infolge der Torsionsspannung zu:

$$S_{\text{Ziel}} = T_A = \frac{\pi}{2} \cdot r^3 \cdot G \cdot \varepsilon \quad (4.5)$$

Der Durchmesser der Welle d_{Welle} ist als funktionsrelevantes Gestaltelement aus der Auslegung bekannt und liefert damit den Radius r . Das Gleiche gilt für das Material der Welle, aus dem sich der Schubmodul G_{Stahl} ergibt. In der Regel sind auch die Toleranzen dieser beiden Parameter aus der Auslegung bekannt. Daher kann die Messunsicherheit direkt anhand der Toleranzen der Parameter ermittelt werden.

Werden die Werte der funktionsrelevanten Parameter verändert, muss dies im mathematischen Modell der Auswertung berücksichtigt werden. Verändern sich jedoch die Zusammenhänge der funktionsrelevanten Parameter oder es entstehen neue funktionsrelevante Parameter, verliert das mathematische Modell der Auswertung seine Gültigkeit, da der neue funktionale Zusammenhang und die neuen Parameter nicht abgebildet werden. Es

muss ein neues mathematisches Modell der Auswertung anhand der neuen Gestalt erstellt werden.

Am Beispiel, das in Abbildung 4.10 gezeigt ist, führt eine Änderung der Ausprägung des Durchmessers d_{Welle} zu einer notwendigen Anpassung des Parameters im mathematischen Modell der Auswertung in Gleichung (4.5). Ein Wechsel von einer Vollwelle hin zu einer Hohlwelle erzeugt jedoch den funktionsrelevanten Parameter d_{Innen} der Leitstützstruktur LSS_1 und Gleichung (4.4) verliert seine Gültigkeit. Damit verliert auch das mathematische Modell der Auswertung seine Gültigkeit und eine weitere Verwendung führt zu unsicheren Messungen.

Diese Aufteilung in Oberflächen- und Volumeneigenschaften, bzw. Eigenschaften der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen, ermöglicht eine genauere Betrachtung des Transformationsteils der Messkette¹⁸⁶ und somit eine feingliedrigere systematische Identifikation von Parametern, die berücksichtigt werden müssen.

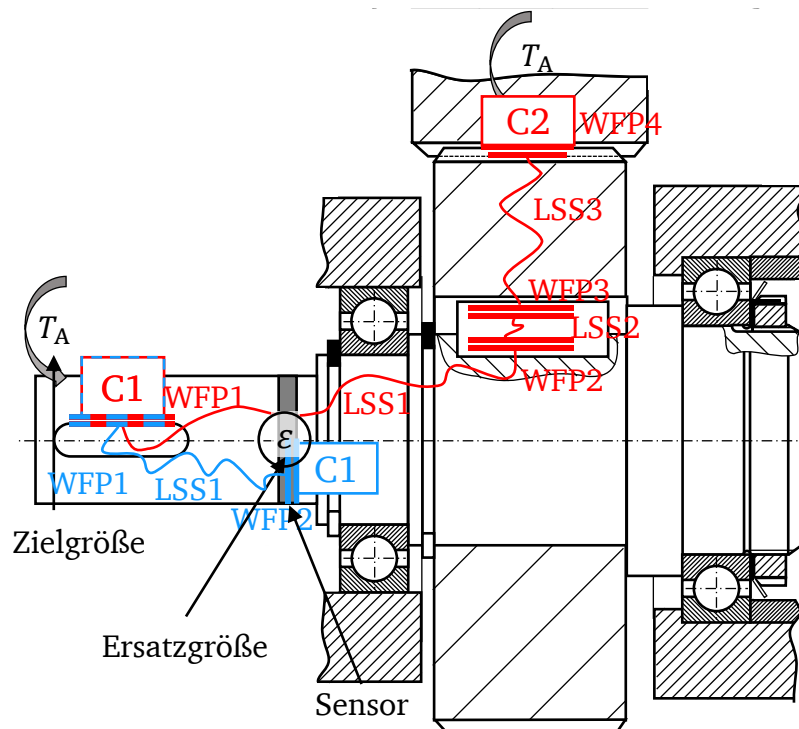


Abbildung 4.10: Obere Hälfte: Ausschnitt eines Lastpfades der Funktion *Energie leiten*; untere Hälfte: Ausschnitt eines Informationspfades der Funktion *Signal leiten*.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Analyse des bestehenden Systems, vgl. Abbildung 4.11 unten. Die Unsicherheiten infolge des Sensors oder durch die Anbindung des Sensors werden nicht betrachtet und als ideal angenommen. Für die Bewertung der Leitung des Signals zum Sensor und damit der Ersatzgröße ist die Betrachtung ausreichend. Für die Bewertung des gesamten Messsystems müssen anschließend alle Elemente der vollständigen Messkette berücksichtigt werden, vgl. Abbildung 4.11.

¹⁸⁶ Sommer, Kessel (2014) S. 36.

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge zwischen der Messkette, der funktionsrelevanten Parameter für die Messung und den bestehenden Bauteilen für die ursprüngliche Funktion kann Abbildung 4.11 betrachtet werden. Die Elemente der allgemeinen Messkette nach SOMMER UND SIEBERT können in den Funktionen *Einleitung der Zielgröße*, *Signal leiten*, *Signal wandeln*, *erneutes Signal hergeleitet* und die *Auswertung* aufgeteilt werden.¹⁸⁷ Zur Erfüllung der Funktion werden Gestaltelemente benötigt, deren Eigenschaften wieder durch das C&C²-Modell abgebildet werden können. Bei der Integration eines Sensors basiert die Leitung des mechanischen Signals von der Zielgröße hin zur Ersatzgröße auf den Eigenschaften des bestehenden Systems, während die Wandlung der Ersatzgröße in ein elektrisches Signal und die Leitung des elektrischen Signal auf den Eigenschaften des integrierten Sensorsystems basiert.

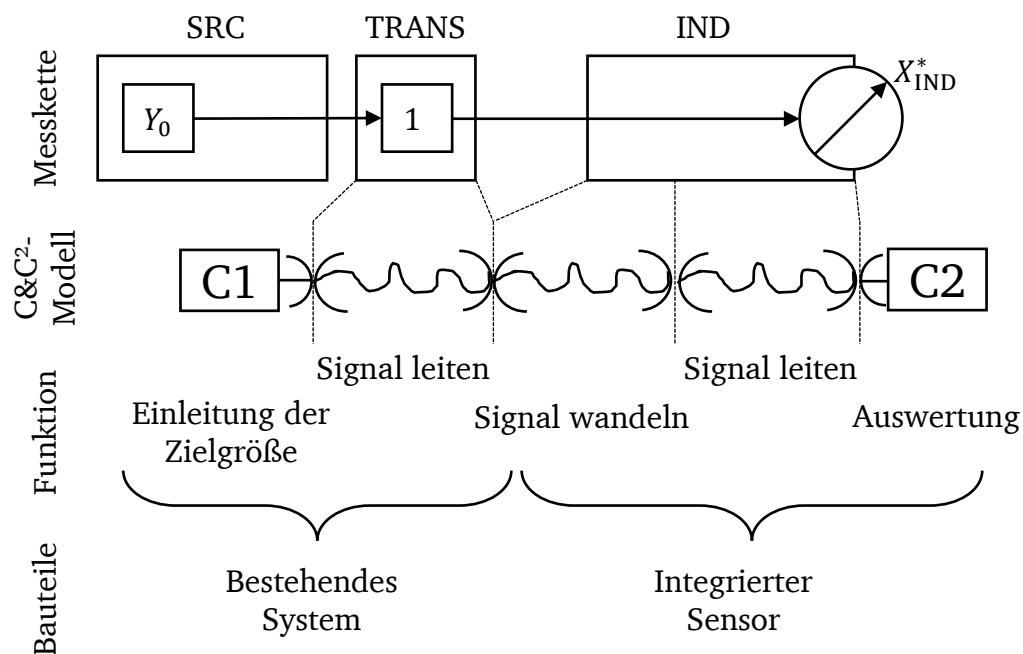


Abbildung 4.11: Zusammenhang von Elementen der idealen Messkette, des C&C²-Modells, der Teilfunktionen und den Bauteilen des Systems.¹⁸⁸

4.2.3 Berücksichtigung von Störgrößen

Wie in Abschnitt 4.2.2 bereits erwähnt, führt die Nichtberücksichtigung von funktionsrelevanten Parametern zu einem Verlust der Gültigkeit des mathematischen Modells der Auswertung. Dies hat eine große Messunsicherheit zur Folge, denn der gemessene Wert stimmt nicht mit dem tatsächlich vorliegenden überein, da das mathematische Modell die Realität nicht vollständig abbildet.

¹⁸⁷ Sommer, Siebert (2004) S. 57.

¹⁸⁸ Bildquelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Sommer, Siebert (2004) S.57.

Der nichtberücksichtigte Parameter wird damit zu einer Störgröße, die das Messergebnis verfälscht. Auch eine vereinfachte Darstellung des mathematischen Zusammenhangs führt zu einer Abweichung des Ergebnisses von der Realität. Nach SOMMER, SIEBERT müssen die Unvollkommenheiten im mathematischen Modell berücksichtigt werden, um eine Aussage über die Messunsicherheit treffen zu können.¹⁸⁹ Die Umsetzung der Berücksichtigung wird jedoch nicht weiter ausgeführt. ROSSI ET AL. unterscheiden die Störgrößen in diejenigen, die additiv und diejenigen, die multiplikativ berücksichtigt werden müssen.¹⁹⁰ Additive Störgrößen haben eine Nullpunktverschiebung zur Folge. Ist der Einfluss der Störgröße nicht bekannt, aber konstant, ist nur eine relative Messung möglich. Ist der Einfluss der Störgröße nicht konstant, wird auch die relative Messung verfälscht und es entsteht ein statistischer Fehler. Multiplikative Störgrößen haben eine Änderung der Steigung der Messkurve zur Folge. Ist der Einfluss der Störgröße nicht bekannt, aber konstant, kann meist um einen kalibrierten Arbeitspunkt gemessen werden. Mit größerem Abstand zum Arbeitspunkt wird die Messung ungenauer. Ist der Einfluss der Störgröße nicht konstant, entsteht ebenfalls ein statistischer Fehler, der die Genauigkeit der Messung verringert.

In der Entwicklung und Auslegung von Komponenten, deren Funktion die Energieübertragung beinhaltet, wird mit sogenannten Mindestsicherheiten sichergestellt, dass Ungenauigkeiten in der Berechnung berücksichtigt und die Bauteile nicht überbeansprucht werden.¹⁹¹ Dieses Vorgehen sorgt dafür, dass die Komponenten fester ausgelegt werden und auch bei teilweise ungenauen Annahmen ihre Funktion erfüllen können. Auch für die Schwankung von funktionsrelevanten Parametern werden Toleranzbereiche festgelegt, in welchen sich der reale Wert befinden darf, um die gewünschte Funktion zu gewährleisten.¹⁹² Alternativ können Komponenten und Systeme so gestaltet werden, dass sie robust gegenüber bekannten Störgrößen sind, deren Auftreten zwar bekannt, die Stärke jedoch nicht bekannt ist. So präsentiert MATTHIAS drei Strategien, um diese Unsicherheit zu reduzieren: *Unsicherheit eliminieren*, *Unsicherheitseinfluss unterdrücken* und *Unsicherheitswirkung reduzieren*.¹⁹³ Diese Strategien können auch auf Unsicherheiten bei Messungen angewendet werden. So kann die Temperaturabhängigkeit eines Dehnmessstreifens berücksichtigt werden, indem dieser Dehnmessstreifen nur bei einer bestimmten Temperatur eingesetzt werden darf, der Dehnmessstreifen gekühlt wird oder das Trägermaterial so gewählt wird, dass der Einfluss der Temperatur durch die thermische Dehnung des Trägermaterials kompensiert wird.

Abbildung 4.12 zeigt die Übertragungsfunktion des Schubmoduls G_{Stahl} auf die Ersatzgröße ε für das in Abbildung 4.10 präsentierte Beispiel. Das Toleranzfeld für den funk-

¹⁸⁹ Sommer, Siebert (2004) S. 57.

¹⁹⁰ Rossi et al. (2019) S. 1346.

¹⁹¹ Sauer (2016) S. 67ff.

¹⁹² Sauer (2016) Sauer (2016) S. 19ff.

¹⁹³ Matthias (2015) S. 104ff.

tionsrelevanten Parameter *Schubmodul* G_{Stahl} erzeugt je nach lokaler Steigung der Übertragungsfunktion ein Toleranzfeld, das den Bereich angibt, in dem sich die tatsächliche Messgröße befindet. Das Toleranzfeld der Messung, in diesem Beispiel das Feld der Ersatzgröße, beschreibt die Messunsicherheit.

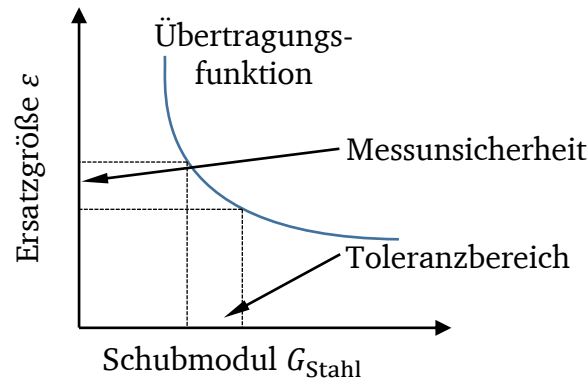


Abbildung 4.12: Beispielhafte Übertragungsfunktion von einem funktionsrelevanten Parameter zum Messergebnis für eine konstante Zielgröße.

Auch für die weiteren funktionsrelevanten Parameter der in Gleichung (4.5) gezeigten Übertragungsfunktion kann eine Betrachtung der Sensitivität angestellt werden. Je nach lokaler Steigung der Übertragungsfunktion um den Betriebspunkt wirkt sich die Schwankung des funktionsrelevanten Parameters unterschiedlich stark auf die Genauigkeit des Messergebnisses aus. Bei einem schwachen Zusammenhang bzw. einer flachen Übertragungsfunktion ist die Messung robuster gegenüber der Schwankung des funktionsrelevanten Parameters als bei einem starken Zusammenhang. Bei der Verwendung des bestehenden Systems für die Funktion *Signal leiten* können die bestehenden Toleranzen und Ungenauigkeiten des physikalischen Zusammenhangs jedoch oft unzureichend sein.¹⁹⁴ Das hat zur Folge, dass für die sensorische Weiterentwicklung des bestehenden Systems höhere Anforderungen an Toleranzen und Verständnis der funktionellen Zusammenhänge gestellt werden.¹⁹⁵ Für eine Steigerung der Messgenauigkeit kann die Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge verbessert, die Fertigungsgenauigkeit gesteigert oder eine andere Ersatzgröße, die eine geringere Empfindlichkeit gegenüber den Unsicherheitsquellen aufweist, gewählt werden. Zusätzlich können die funktionsrelevanten Parameter vor dem Betrieb oder sogar während des Betriebs gemessen werden, um die Unsicherheit über die realen Werte zu verringern.

4.2.4 Besonderheit bei parallelen Lastpfaden

Bei einer Messung einer lokalen Eigenschaft innerhalb eines eindeutigen Lastpfades, wie es für das in Abbildung 4.10 gezeigte Beispiel getan wird, müssen die lokalen

¹⁹⁴ Vgl. Martin et al. (2018b) S.74ff; Vogel et al. (2018) S.3035ff; Schirra et al. (2018).

¹⁹⁵ Schork et al. (2016).

Eigenschaften berücksichtigt werden. Abbildung 4.13 zeigt eine Reihenschaltung von Federn, innerhalb der die Zielgröße F_{Ziel} gemessen werden soll, die als Beispiel für einen eindeutigen Lastpfad dient. Für die Messung der lokalen Dehnung f_{Lokal} der Feder c_1 als Ersatzgröße für die Zielgröße F_{Ziel} folgt die Übertragungsfunktion:

$$H_1 = \frac{f_{\text{Lokal}}}{F_{\text{Ziel}}} = \frac{1}{c_1} \quad (4.6)$$

Die Sensitivität der Übertragungsfunktion gegenüber den Schwankungen der Eigenschaften c_1 und c_2 der beiden Federn als Elemente des Lastpfades ergeben sich zu:

$$\frac{dH_1}{dc_1} = -\frac{1}{c_1^2} \quad (4.7)$$

$$\frac{dH_1}{dc_2} = 0 \quad (4.8)$$

Die Schwankung der Eigenschaft der Feder c_2 hat keinen Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Zielgröße F_{Ziel} und Ersatzgröße f_{Lokal} .

Für die Messung der globalen Eigenschaft f_{Global} folgt die Übertragungsfunktion:

$$H_2 = \frac{f_{\text{Global}}}{F_{\text{Ziel}}} = \frac{c_1 + c_2}{c_1 \cdot c_2} \quad (4.9)$$

Und die Sensitivität gegenüber der Schwankung der Eigenschaften der Elemente des Lastpfades ergeben sich zu:

$$\frac{dH_2}{dc_1} = -\frac{1}{c_1^2} \quad (4.10)$$

$$\frac{dH_2}{dc_2} = -\frac{1}{c_2^2} \quad (4.11)$$

Die lokale Eigenschaft ist somit robuster gegenüber den Schwankungen, da sie gegenüber weniger Parametern eine Sensitivität aufweist. Die Messung der globalen Eigenschaft muss alle Elemente des Lastpfades berücksichtigen. Übertragen auf das Beispiel von Abbildung 4.10 bedeutet das, dass die gewählte Ersatzgröße *lokale Dehnung* gegenüber Schwankungen der Eigenschaften des Lastpfades robuster als die Ersatzgröße *globale Verschiebung* ist.

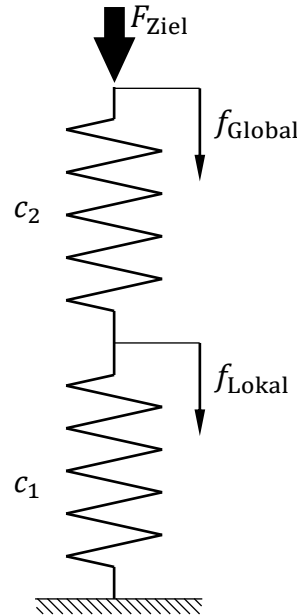


Abbildung 4.13: Reihenschaltung von Federn als Beispiel für einen eindeutigen Lastpfad.

Bei Messungen einer lokalen Eigenschaft eines Lastpfades, der Teil eines Systems an parallelen Lastpfaden ist, müssen, im Gegensatz zu einer Messung einer lokalen Eigenschaft eines eindeutigen Lastpfades, die Eigenschaften aller Lastpfade berücksichtigt werden. Als Beispiel wird in Abbildung 4.14 die Parallelschaltung von Federn dargestellt. Die Übertragungsfunktion von Zielgröße F_{Ziel} zur lokalen Eigenschaft f_{Lokal} ist gleich der Übertragungsfunktion von Zielgröße f_{Ziel} zur globalen Eigenschaft f_{Global} :

$$H_3 = \frac{f_{\text{Global}}}{F_{\text{Ziel}}} = \frac{f_{\text{Lokal}}}{F_{\text{Ziel}}} = \frac{1}{c_1 + c_2} \quad (4.12)$$

Die Sensitivität der Übertragungsfunktion hinsichtlich der Schwankung der Eigenschaften der beiden Elemente ergibt sich zu:

$$\frac{dH_3}{dc_1} = -\frac{1}{(c_1 + c_2)^2} \quad (4.13)$$

$$\frac{dH_3}{dc_2} = -\frac{1}{(c_1 + c_2)^2} \quad (4.14)$$

Das hat zur Folge, dass die Messung der lokalen Eigenschaft in einem parallelen Lastpfad eine Sensitivität gegenüber den Eigenschaften der Elemente des parallelen Lastpfades aufweist. Zusätzlich hat das zur Folge, dass die Messung einer globalen Eigenschaft von parallelen Lastpfaden eine größere Robustheit gegenüber der Schwankung der Parameter aufweist als die Messung einer globalen Eigenschaft von eindeutigen Lastpfaden.

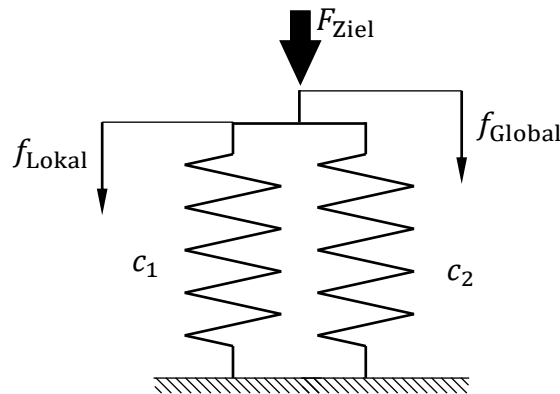


Abbildung 4.14: Parallelschaltung von Federn als Beispiel für parallele Lastpfade.

Für die sensorische Weiterentwicklung der in Abbildung 4.15 gezeigten elastischen Klauenkupplung bedeutet dies, dass die Funktion *Signal leiten*, die im unteren Teil dargestellt ist, die Eigenschaften der parallelen Lastpfade, die im mittleren Teil gezeigt sind, berücksichtigen muss. Damit müssen Parameter berücksichtigt werden, die nicht von den Gestaltelementen *Wirkflächenpaare* und *Leitstützstrukturen* der Funktion *Signal leiten* abgebildet werden. Diese Einflüsse müssen folglich durch die Connectoren, die die Randbedingungen des betrachteten Systems beinhalten, in die Übertragungsfunktion integriert werden:

$$\frac{S_{\text{Ersatz}}}{S_{\text{Ziel}}} = f\{WFP_i; LSS_i; C_i\} \quad (4.15)$$

Auch EIFLER zeigt, dass die Messung der Last in einem Lastpfad von den Toleranzen der parallelen Lastpfade abhängt.¹⁹⁶ Dies macht solche Systeme sensibler gegenüber Störgrößen, die aus Toleranzen resultieren. KLAUER zeigt dies, indem toleranzbedingte geometrische Variationen einer eindeutigen sensorischen Welle-Nabe-Verbindung mit den Variationen einer nicht eindeutigen sensorischen Welle-Nabe-Verbindung vergleicht.¹⁹⁷

¹⁹⁶ Eifler (2014) S. 144ff.

¹⁹⁷ Klauer (2018) S. 73ff.

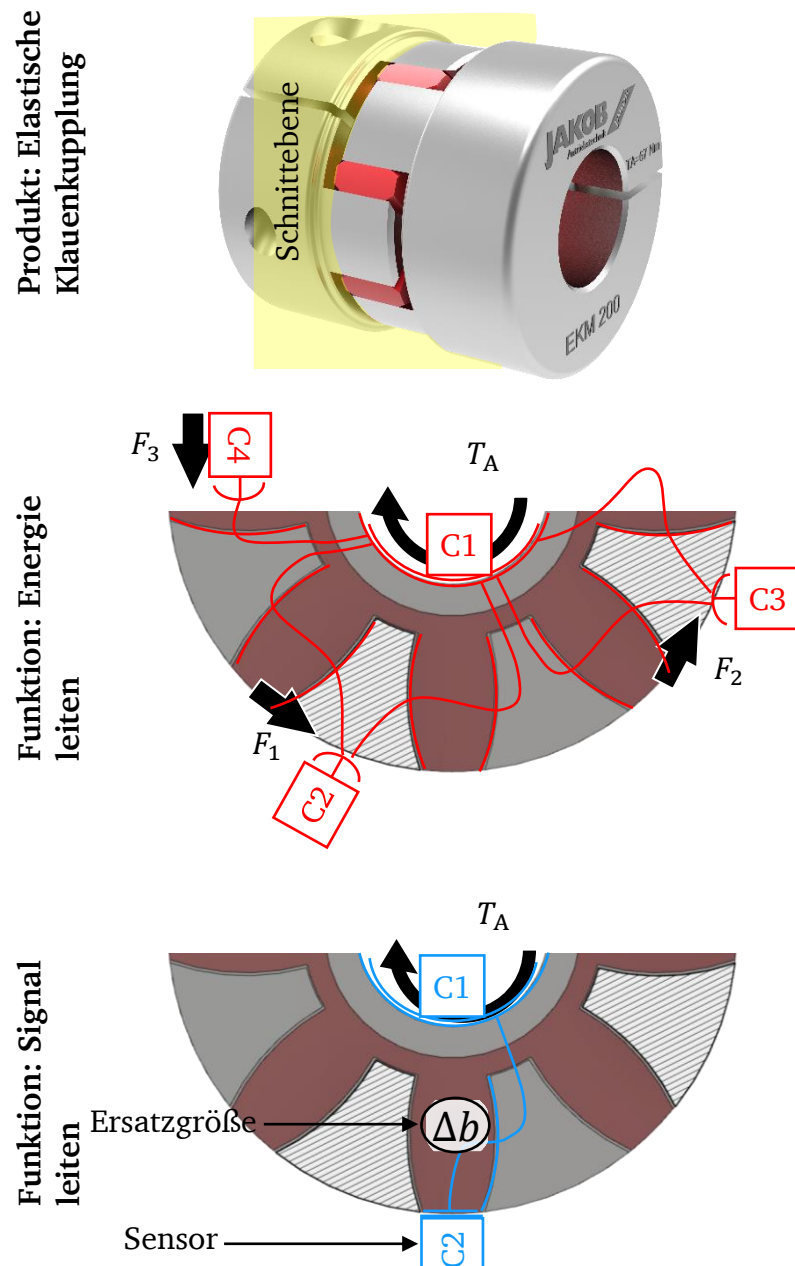


Abbildung 4.15: Oben: Seitenansicht einer elastischen Klauenkupplung; Mitte: Schnittansicht der Klauen mit C&C²-Modell der Funktion *Energie leiten*, in der die Verzweigung des Kraftflusses deutlich wird; Unten: C&C²-Modell der Funktion *Signal leiten* für das Messen der Ersatzgröße *Einfederung eines Zahns des Elastomerkranzes*.

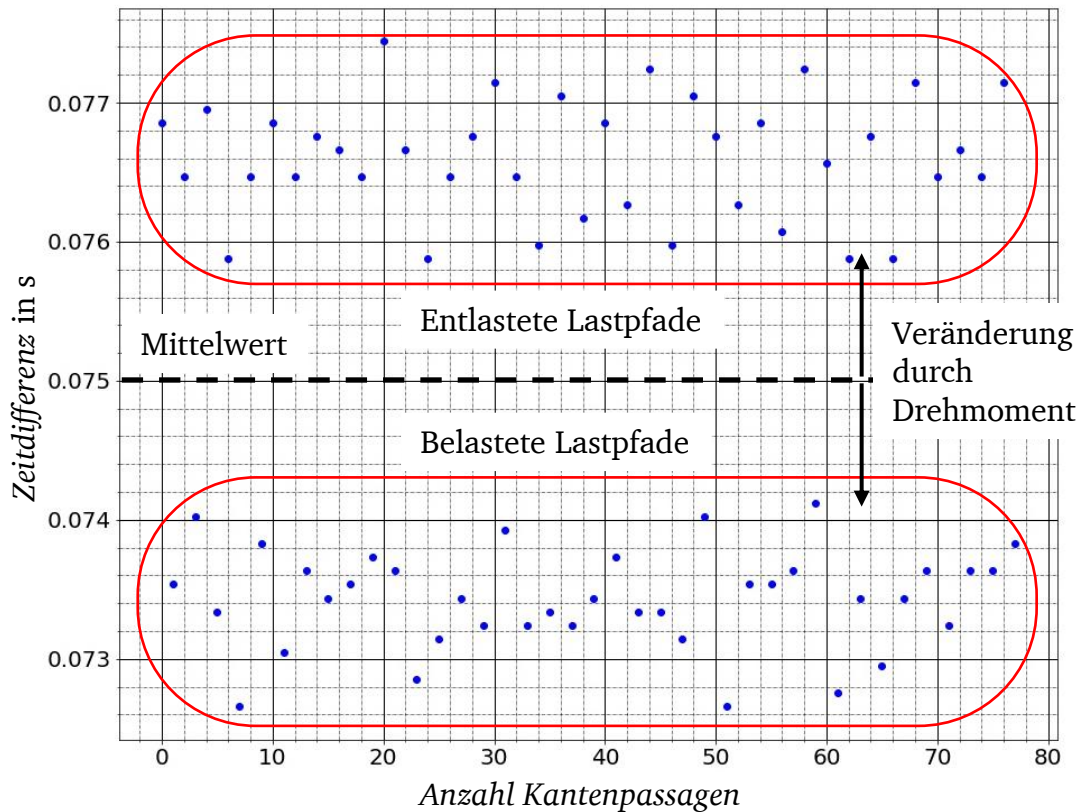


Abbildung 4.16: Berührungslos messbarer Effekt der Einfederungen infolge des Drehmoments.

Die Berücksichtigung der Aufteilung der Last kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Für die Funktion *Energie leiten* erfolgt die Berücksichtigung der Aufteilung häufig durch die Annahme einer symmetrischen Aufteilung mit einem Traganteil, der Abweichungen von der symmetrischen Aufteilung kompensiert. Für die Auslegung von Komponenten ist diese Annahme häufig ausreichend genau, für die sensorische Verwendung ist diese Annahme jedoch häufig nicht ausreichend¹⁹⁸ und es werden präzisere Modelle für die Aufteilung der Lasten benötigt. Alternativ können die Einfederungen aller Lastpfade gemessen werden, zum Beispiel mittels einer berührungslosen Kantendetektion, mit der die Zeitunterschiede bei der Passage der Kanten der Kupplung gemessen werden. Abbildung 4.16 zeigt die Ergebnisse für eine konstante Drehzahl und ein konstantes Drehmoment. Auf der y-Achse ist die Zeitdifferenz zwischen zwei Kantenpassagen aufgetragen. Auf der x-Achse ist die Anzahl an detektierter Kanten aufgetragen. Bei steigendem Drehmoment steigt der Abstand der Kanten, die im entlastenden Lastpfad liegen, obere Messpunkte. Der Abstand der Kanten, die im belasteten Lastpfad liegen, sinkt dagegen, untere Messpunkte. Belastete und entlastete Lastpfade passieren den Sensor immer im Wechsel. Nach acht Kantenpassagen passiert wieder derselbe Lastpfad den Sensor. Durch die Messung der Ein- und Ausfederung aller Lastpfade können nun alle Lastpfade bei der Auswertung berücksichtigt werden und die Summe der gemessenen Teildrehmomente gebildet werden. Auch kann

¹⁹⁸ Schork et al. (2016) S. 10.

anhand der Messung aller Lastpfade die globale Einfederung gemessen werden, die eine geringere Abhängigkeit gegenüber Schwankungen der einzelnen Steifigkeiten besitzt, vgl. Gl. (4.10), (4.11), (4.13) und (4.14).

4.2.5 Besonderheit bei Umformung und Wandlung innerhalb des Wirknetzes

Werden Flussgrößen, wie zum Beispiel Kräfte durch Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen geleitet, können diese am Eingang und am Ausgang in unterschiedlichen Größen vorliegen. Nach ROTH handelt es sich hierbei um die allgemeine Funktion *Umformen*, die eine Änderung der Darstellungsform der allgemeinen Größe bewirkt und in der Regel zusammen mit der allgemeinen Funktion *Leiten* auftritt.¹⁹⁹ Für das Beispiel Kräfte und Momente, die auf einen Körper wirken gelten folgende Gleichgewichtsbedingungen:

$$m\ddot{x}_i = \sum_j F_{ij} \quad (4.16)$$

$$\Theta\ddot{\phi}_i = \sum_j M_{ij} \quad (4.17)$$

Für einen Körper, der keine Beschleunigung erfährt, müssen sich die angreifenden Kräfte F_j für alle Richtungen x_i ausgleichen. Wird eine Flussgröße durch ein System geleitet und umgeformt, entspricht der Betrag des Ausgangs nicht mehr dem Betrag des Einganges. Die Umformung kann mit U beschrieben werden:

$$F_{\text{Aus}} = U \cdot F_{\text{Ein}} \quad (4.18)$$

Für $U \neq 1$ gilt: $|F_{\text{Aus}}| \neq |F_{\text{Ein}}| \quad (4.19)$

Abbildung 4.17 zeigt ein Freikörperbild eines nicht beschleunigten Festkörpers, in dem die Flussgröße F_{Ein} während der Leitung zu F_{Aus} umgeformt wird. Die angreifenden Kräfte weisen aufgrund der Umformung, die parallel der Leitung der Flussgröße stattfindet, unterschiedliche Beträge auf, vgl. Gleichung (4.19). Für einen nicht beschleunigten Festkörper hat das zur Folge, dass die Größen, die auf das System einwirken, allein kein Gleichgewicht herstellen können und mindestens eine weitere Größe notwendig wird:

$$0 = F_{\text{Aus}} + F_{\text{Ein}} + F_{\text{Komp}} \quad (4.20)$$

Für die Leitung der zusätzlichen Größe F_{Komp} wird ein weiteres Wirknetz zur Erfüllung der sekundären Funktion *Gleichgewicht herstellen* benötigt. Durch die Funktion *Umformen* ist die Eingangsgröße F_{Ein} durch die zusätzliche Größe F_{Komp} beschreibbar:

$$F_{\text{Komp}} = -F_{\text{Ein}}(U + 1) \quad (4.21)$$

¹⁹⁹ Roth (2000) S. 82.

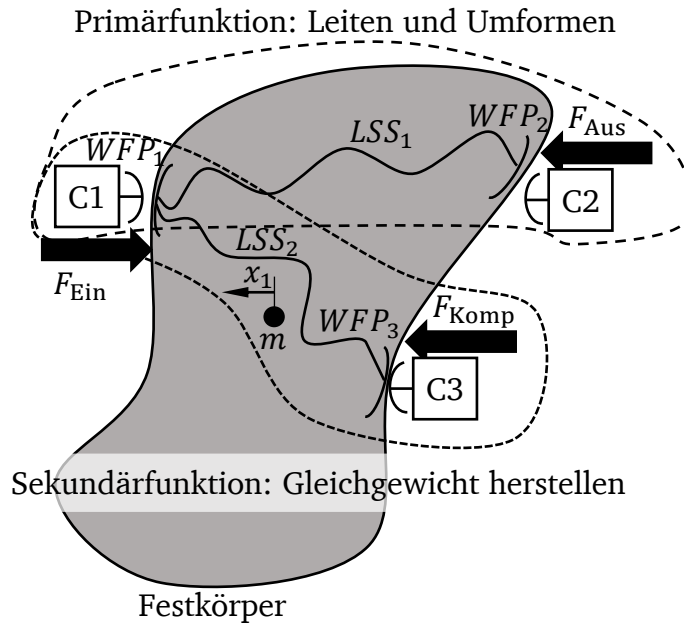


Abbildung 4.17: Freikörperbild eines allgemeinen Festkörpers mit Primärfunktion: Leiten und Umformen und der notwendigen sekundären Funktion: Gleichgewicht herstellen.

Abbildung 4.18 zeigt wieder das C&C²-Modell für die Funktion *Umformung*. Im oberen Teil ist ein Teil des Lastpfades des *Drehmoments* hervorgehoben. Hier wird im Zahneingriff eine tangentielle Kraft eingeleitet. Am Wellenende wird diese Flussgröße als Drehmoment aus der Welle ausgeleitet. Dazwischen erfährt die Flussgröße eine Leitung und eine Umformung. Für eine konstante Winkelgeschwindigkeit der Welle folgt die Gleichgewichtsbedingung:

$$\Theta \ddot{\phi} = 0 = -T_1 + F_1 \cdot r_{\text{Zahnrad}} \quad (4.22)$$

Die Gleichgewichtsbedingung für einen Körper, der keine radiale Beschleunigung erfährt, ist jedoch nicht erfüllt:

$$m \ddot{x}_r = 0 \neq F_1 \quad (4.23)$$

Dies macht mindestens eine zusätzliche Kraft notwendig, die zum Erfüllen der Gleichgewichtsbedingung führt. Im unteren Teil von Abbildung 4.18 sind die weiteren Lastpfade der *Reaktionskräfte* hervorgehoben. Die Umformung der primären Flussgröße *Drehmoment* macht die beiden *Reaktionskräfte* F_2 und F_3 notwendig, die durch die zusätzlichen Lastpfade innerhalb des C&C²-Modells zur Ausgangsgröße F_1 geleitet werden. Für diese Leitung sind die Gestaltelemente der Leitstützstrukturen LSS_1 bis LSS_4 und der Wirkflächenpaare WFP_1 bis WFP_5 funktionsrelevant. Das führt dazu, dass auch innerhalb der Gestaltelemente des C&C²-Modells nach veränderlichen Parametern gesucht werden kann, die nicht Teil des Lastpfades der primär geleiteten Größe sind, vgl. Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5.

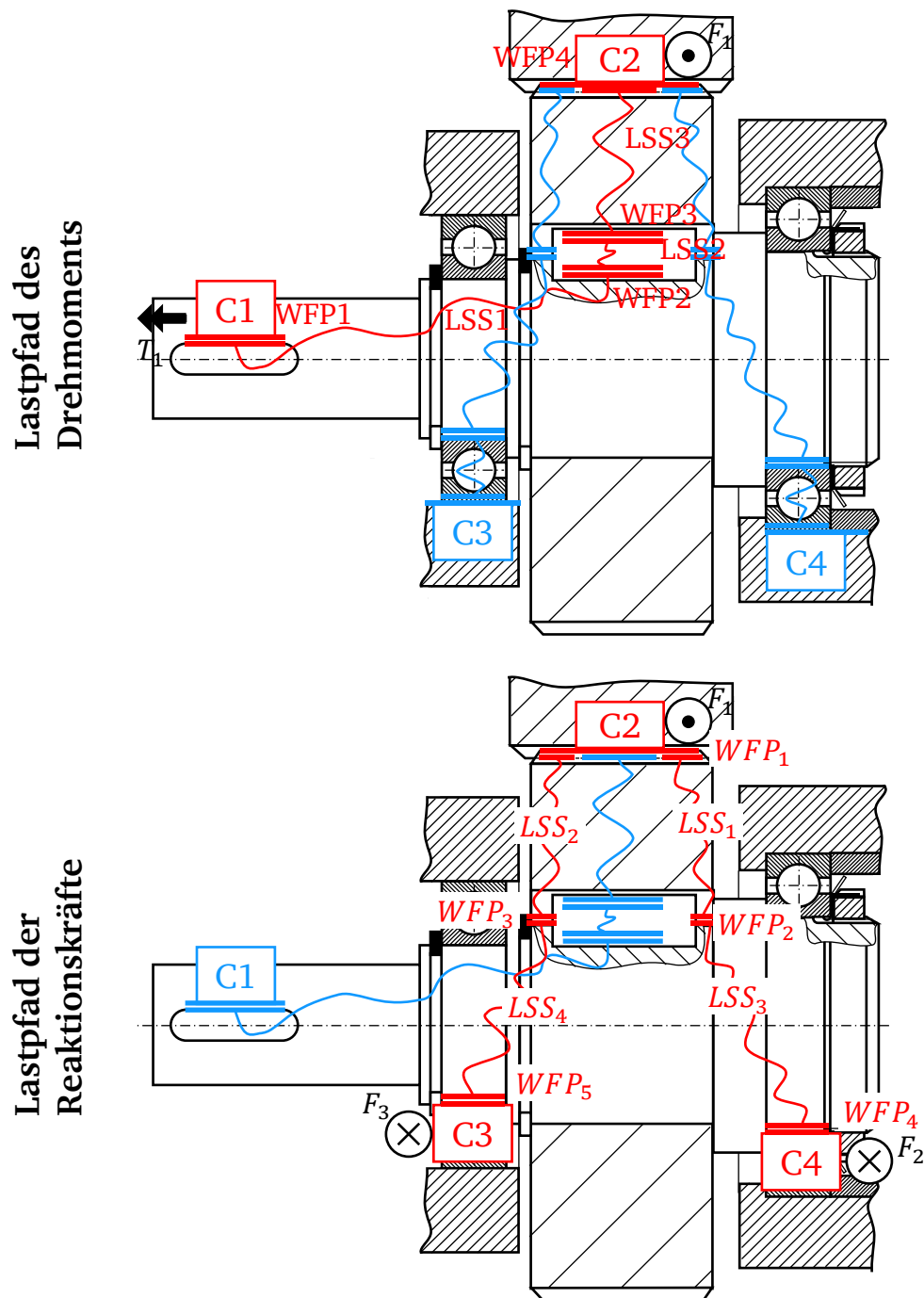


Abbildung 4.18: Unterfunktionen der Kraftleitung innerhalb des C&C²-Modells der Funktion *Umformen*; Oben: Hervorhebung des Lastpfades des Drehmomentes; Unten: Hervorhebung der Lastpfade der Reaktionskräfte.

In Abbildung 4.19 ist ein Ausschnitt des C&C²-Modell der Funktion *Signal des Drehmoments leiten* dargestellt. Dieser Ausschnitt zeigt den Informationspfad des Drehmoments für den Fall, dass die Lagerkraft F_2 als Ersatzgröße für das Drehmoment T_1 dient. Hierbei muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass das Signal von anderen Signalen überlagert wird. Da die Lager die Funktionen *Kippmomente aufnehmen*, *Radialkräfte aufnehmen* und *Axialkräfte aufnehmen* erfüllen, wird das mechanische Signal, anhand dessen

das Torsionsmoment gemessen wird, von den Signalen der anderen Funktionen überlagert. Dies führt dazu, dass in diesem Beispiel die Axialkraft infolge einer Schrägverzahnung im Connector C_2 und das Gewicht der Welle in den Leitstützstrukturen LSS_i berücksichtigt werden muss, um den Zusammenhang der Zielgröße mit der Ersatzgröße beschreiben zu können:

$$\frac{F_2}{T_1} = f\{C_1; LSS_i; WFP_i\} \quad (4.24)$$

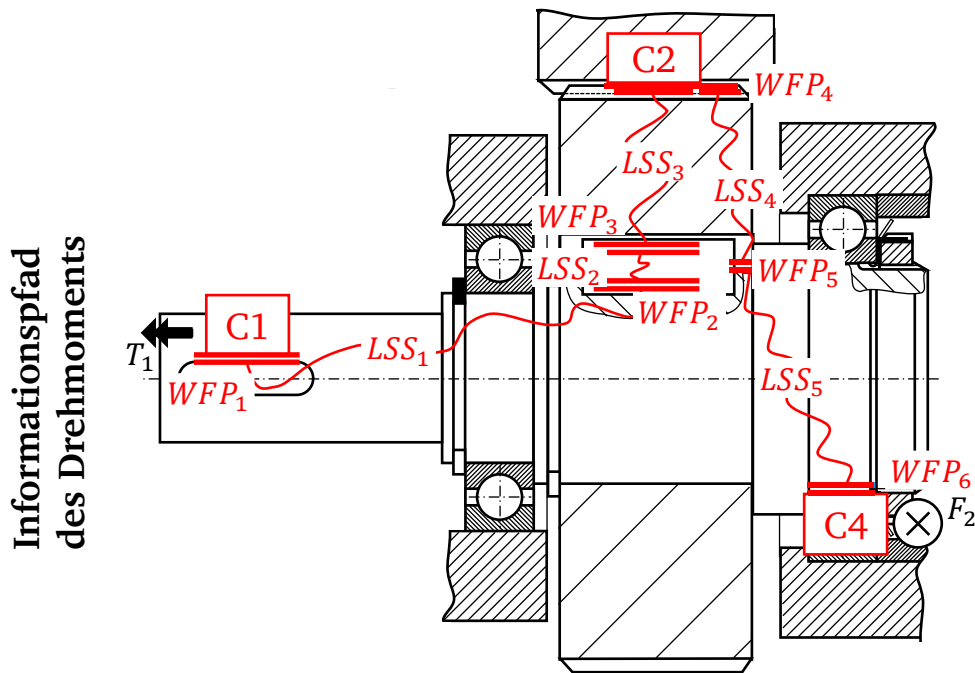


Abbildung 4.19: Ausschnitt des Informationspfades des Drehmoments innerhalb des C&C²-Modells für den Fall der Nutzung von F_2 als Ersatzgröße.

In Abbildung 4.20 ist ein Elektromotor gezeigt, der elektrische Energie in mechanische Energie wandelt. Zusätzlich ist in Abbildung 4.20 ein Ausschnitt des Lastpfades innerhalb des C&C²-Modells der Funktion *Drehmoment erzeugen* eingetragen. Die Flussgröße elektrischer Strom I wird am Connector C_2 in das betrachtete System eingeleitet und am Getriebeausgang als Drehmoment T_1 ausgeleitet. Die Flussgröße ändert im Elektromotor während der Leitung ihre Art und wird gewandelt.²⁰⁰ Anschließend wird die Flussgröße Drehmoment T_3 im Getriebe mehrfach umgeformt, bis am Getriebeausgang die Flussgröße T_1 aus dem System austritt. Die Betrachtung der Flussgrößen anstatt der Energie ermöglicht die Beschreibung des Zusammenhangs von elektrischem Strom I und Drehmoment T_3 auch bei blockierter Welle, da im Falle des Stillstandes der Welle keine Energie übertragen wird, sondern lediglich elektrische Energie in thermische Energie gewandelt wird. Dennoch müssen die Bedingungen der Erhaltungsgleichungen, Energie-, Massen-, Ladungs- und Impulserhaltung weiterhin erfüllt werden. Dies führt dazu, dass, wie beim

²⁰⁰ Roth (2000) S.82 und Pahl et al. (2007) S. 48.

Umformen zusätzliche Größen entstehen, die weitere (sekundäre) Funktionen notwendig machen. Die Beschreibung anhand der funktionalen Zusammenhänge ermöglicht es dann wieder, in den funktionsrelevanten Parametern der sekundären Funktionen nach Ersatzgrößen zu suchen. Für das in Abbildung 4.20 gezeigte Beispiel des Getriebemotors bedeutet das, dass das Drehmoment T_1 anhand des Stroms I gemessen werden kann, solange der funktionale Zusammenhang ausreichend genau modelliert werden kann. Alternativ kann das Drehmoment anhand der Reaktionen, die aufgrund der Ausleitung des Drehmoments, wie das in Abbildung 4.19 bereits für *Umformen* gezeigt wurde, gemessen werden. Auch hier muss der funktionale Zusammenhang zwischen der Zielgröße T_1 und der Messgröße I anhand der funktionsrelevanten Parameter gebildet werden:

$$\frac{I}{T_1} = f(C_i, LSS_i; WFP_i) \quad (4.25)$$

Anhand der Anzahl und der Schwankungsbreite der funktionsrelevanten Parameter der Elemente der Funktion *Signal leiten* können die verschiedenen Messgrößen miteinander verglichen, vielversprechende Konzepte ausgewählt und priorisiert werden.

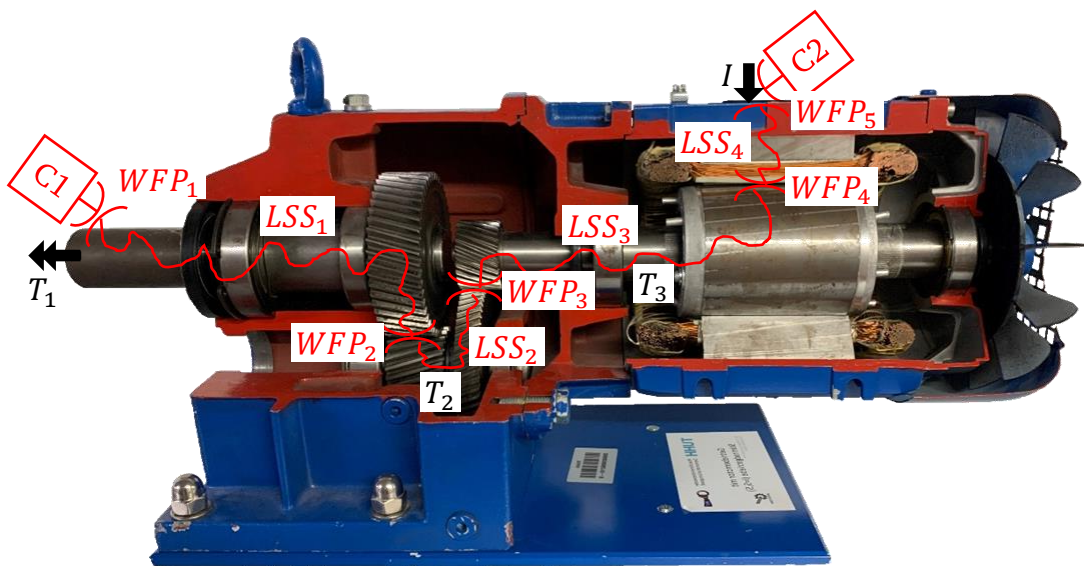


Abbildung 4.20: Lastpfad innerhalb des C&C²-Modells der Funktion *Drehmoment erzeugen*.²⁰¹

4.3 Das Lastpfad- und Knotenmodell

In diesem Abschnitt wird das Lastpfad- und Knotenmodell für die sensorische Weiterentwicklung technischer Systeme vorgestellt. Es handelt sich hierbei um ein Metamodell, das Regeln und Elemente zum Bilden von Lastpfad- und Knotenmodellen von technischen Systemen liefert. Es ergänzt den erweiterten C&C²-Ansatz, der in Abschnitt 4.2 vorgestellt wurde, um die Elemente *Knoten*, *Wandeln* und *Umformen*, die für die Unterstützung

²⁰¹ Bildquelle: Photographie eines Demonstratorgetriebes, das sich in der Lehrmittelsammlung des PKT der TUHH befindet.

bei der sensorischen Weiterentwicklung technischer Systeme, entwickelt wurden. Mit Hilfe des Lastpfad- und Knotenmodells ist es möglich, den Zusammenhang zwischen Ziel- und Ersatzgröße zu erkennen. Im Folgenden werden die Elemente und die Regeln zum Bilden eines Lastpfad- und Knotenmodells vorgestellt.

4.3.1 Elemente des Modells und ihre Eigenschaften

Für die Modellierung mittels Lastpfad- und Knotenmodell stehen Elemente zur Verfügung, aus denen das Modell zusammengesetzt werden kann. Im Folgenden werden die Elemente beschrieben.

Lastpfad

Der Lastpfad beschreibt den Weg, den eine Flussgröße durch das betrachtete System nimmt. Damit ist der Lastpfad ein Teil des Wirknetzes der Funktion *Energie leiten* und zeigt an, an welchen Gestaltelementen des Wirknetzes eine direkte Reaktion als Ersatzgröße dienen kann, vgl. Abbildung 4.21. Ein Lastpfad wirkt zwischen mindestens zwei Lasten oder Knoten. Während der Leitung der Flussgröße durch den Lastpfad wird die Flussgröße, im Gegensatz zu Leitstützstrukturen und Wirkflächenpaaren, nicht gewandelt oder umgeformt. Die Veränderung der Flussgröße wird durch die Elemente *Umformung*, *Wandlung* und *Knoten* modelliert. Tritt ein Lastpfad in einem System auf, muss es dafür einen Eingang und einen Ausgang geben.

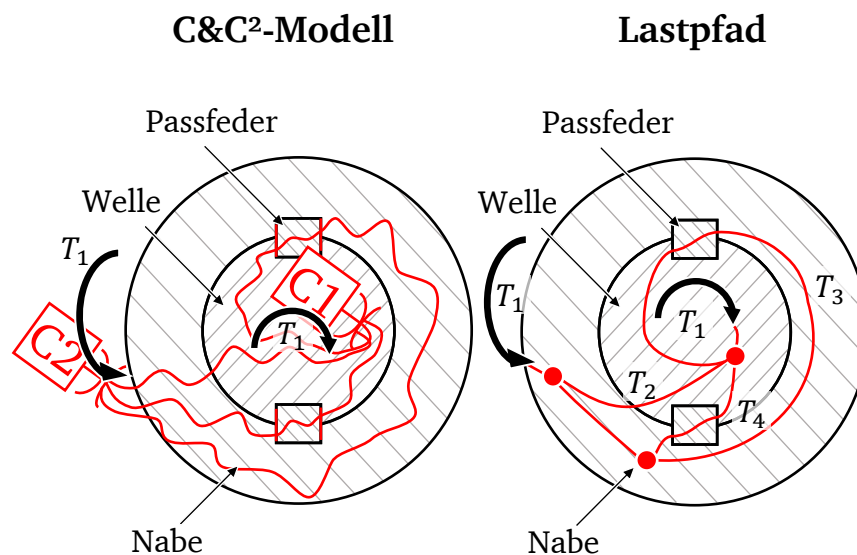


Abbildung 4.21: Vergleich von C&C²-Modell der Funktion *Drehmoment leiten* (links), Lastpfad des angreifenden Momentes (rechts).

Knoten

Knoten kennzeichnen die Aufteilung und Überlagerung von Lastpfaden und können keine Flussgrößen speichern. Wird eine Ersatzgröße innerhalb einer Aufteilung des Lastpfades gemessen, so wird ein Teil des Signals auf den abzweigenden Lastpfaden transportiert und der Sensor erfährt nur einen Anteil der Signalstärke. Ein Knoten zwischen der Ziel- und der Ersatzgröße entspricht einer additiven Beeinflussung der Signalübertragung.²⁰² Durch die Darstellung von Knoten im System wird deutlich, in welchen Abschnitten des Lastpfades Aufteilungen oder Überlagerungen berücksichtigt werden müssen. In Abschnitt 4.2.4 wurde bereits auf die Bedeutung der Aufteilung eines Lastpfades eingegangen. Die Knoten im Lastpfad- und Knotenmodell legen im Gegensatz zum C&C-Ansatz den Fokus mehr auf diese Aufteilung und machen die Orte, an denen diese berücksichtigt werden müssen, deutlicher. Da ein Knoten keine Flussgröße speichern kann, können die Flussgrößen über einen Knoten bilanziert werden. Abbildung 4.22 zeigt den Zusammenhang von Flussgrößen, die in einen Knoten ein- und austreten: Flussgrößen, die in Richtung des Knotens zeigen, gehen positiv in die Bilanz ein und Flussgrößen, die vom Knoten wegzeigen, gehen negativ in die Bilanz ein. Damit unterscheiden sich die Knoten des Lastpfad- und Knotenmodells von den Knoten von Blockschaltbildern, wie sie aus der Regelungstechnik bekannt sind,²⁰³ da hier nur die Richtung der Flussgröße über das Vorzeichen bestimmt, siehe Gleichung (4.26).

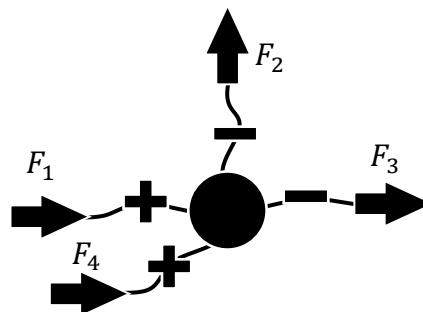


Abbildung 4.22: Rechenregeln für Knoten.

$$0 = F_1 - F_2 - F_3 + F_4 \quad (4.26)$$

Soll die Zielgröße F_1 anhand der Ersatzgröße F_3 gemessen werden, müssen F_2 und F_4 ebenfalls bekannt sein, um aus dem Anteil des Sensorsignals F_3 und der Überlagerung mit F_4 auf die Zielgröße F_1 schließen zu können. Wird nur die Ersatzgröße F_3 gemessen, wird ein Modell für die Aufteilung und Überlagerung innerhalb des Knotens benötigt.

In Abbildung 4.23 ist die Aufteilung des radialen Anteils der Zahnkraft in einer Verzahnung, als Beispiel gezeigt. Der Lastpfad der Flussgröße *Radialkraft* F_{R1} führt durch

²⁰² Vgl. Rossi et al. (2019) S.1346.

²⁰³ Z.B. in Lunze (2014).

die Nabe in die Welle. Innerhalb der Welle teilt sich der Lastpfad auf. Ein Teil der Flussgröße belastet das linke Lager mit der Last F_{R2} und der zweite Teil belastet das rechte Lager mit der Last F_{R3} . Dies hat zur Folge, dass die Messung einer Ersatzgröße innerhalb des grün gekennzeichneten Bereichs der Nabe keine Aufteilung berücksichtigen muss. Die Messung einer Ersatzgröße innerhalb des gelb gekennzeichneten Bereiches der Welle oder einem der Lager muss die Aufteilung der Flussgröße F_{R1} in die Lasten F_{R2} und F_{R3} berücksichtigen. Im Beispiel kann die Aufteilung mithilfe der geometrischen Eigenschaften, wie dem Verhältnis der Lagerabstände zur Lasteinleitung berechnet werden. Liegt nur Information über einen der knotenangrenzenden Lastpfade vor, kann über weitere Nebenbedingungen, z.B. mithilfe des Momentengleichgewichts, ein Modell für den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Lastpfaden im Beispiel hergestellt werden:

$$\frac{F_{R2}}{F_{R3}} = \frac{l_3}{l_2} \quad (4.27)$$

Zusätzlich muss die Überlagerung der Gewichtskraft F_G berücksichtigt werden. Das führt dazu, dass das mathematische Modell der Auswertung für die Messung der Zielgröße F_{R1} anhand der Ersatzgröße F_3 zu:

$$F_{R1} = F_3 \cdot \frac{l_3}{l_1} + F_3 - \frac{F_G}{2} \quad (4.28)$$

folgt. Je größer die Unsicherheit, die die Parameter des Berechnungsmodells aufweisen, desto größer die Messunsicherheit bei der Bestimmung der Zielgröße.

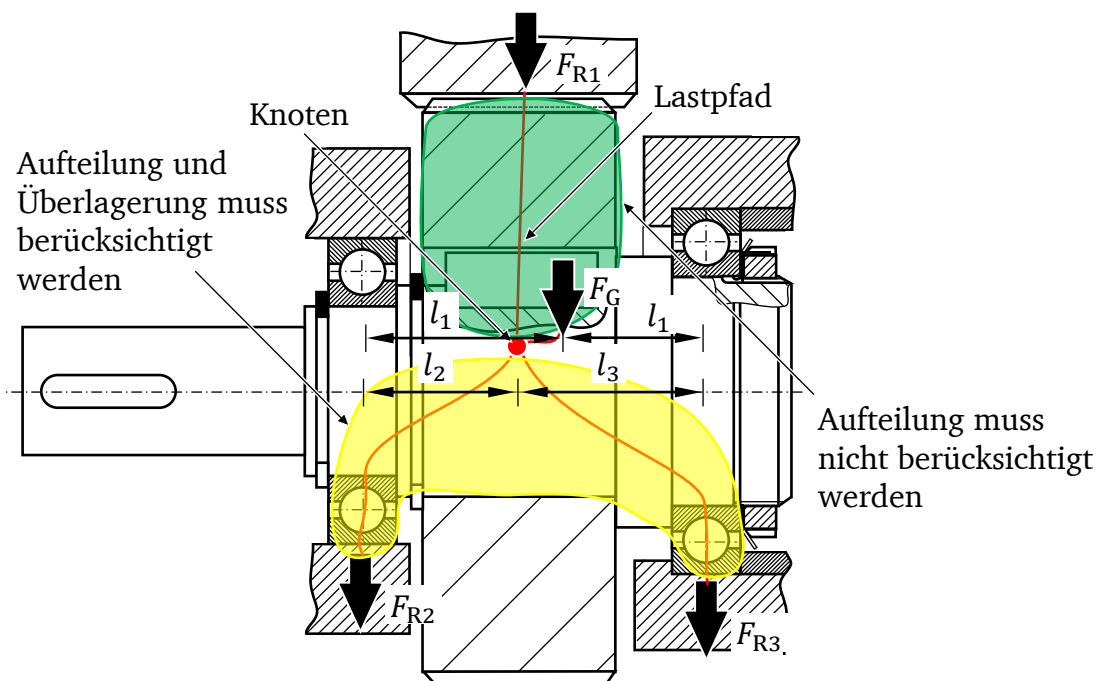


Abbildung 4.23: Unterscheidung von Bereichen, in denen die Aufteilung der radialen Last berücksichtigt werden muss, am Beispiel der Messung der radialen Kraftanteile in einer geradverzahnten Verzahnung einer Getriebewelle.

In anderen Fällen kann die Aufteilung schwerer zu beschreiben sein, weil sie unter anderem von Betriebsparametern, Verschleiß oder auch Reibung abhängen kann. Die Anzahl und Komplexität der zu berücksichtigenden Aufteilungen kann jedoch für einen frühen Vergleich von Konzepten oder zur Priorisierung der verschiedenen Optionen herangezogen werden.²⁰⁴

Umformung

Wie in Abschnitt 4.2.5 bereits gezeigt, verändert eine Umformung die Form²⁰⁵ der geleiteten Flussgröße, die Art der Flussgröße bleibt hierbei jedoch erhalten. Bei einer Umformung wird das Signal, wie in Gl. (4.18) gezeigt, multiplikativ beeinflusst. In Abschnitt 4.2.5 wurde gezeigt, dass dies zusätzliche Reaktionen zur Folge hat, die das Gleichgewicht herstellen. Abbildung 4.24 stellt schematisch das Element *Umformen* und das Entstehen der Reaktionsgröße innerhalb des Elementes dar. Die resultierende Reaktionsgröße benötigt ihren eigenen Lastpfad und muss aus dem System geleitet werden. Der Lastpfad der Reaktionsgröße bietet, wie in Abschnitt 4.2.5 erklärt, die Möglichkeit, eine Ersatzgröße für die Messung der Zielgröße zu finden. Anders als im C&C²-Modell, wird die Reaktionsgröße durch die explizite Darstellung der Umformung direkt sichtbar. Dadurch werden sekundäre Effekte, die für eine Bestimmung der Zielgröße als Ersatzgröße dienen können leichter erkannt.

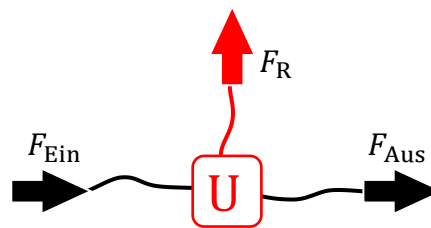


Abbildung 4.24: Das Element *Umformen* mit Ein- und Ausgang der Flussgröße und der resultierenden Reaktionsgröße.

In Abbildung 4.25 ist eine Umformung am Beispiel einer Getriebeausgangswelle abgebildet. Das eingeleitete Drehmoment M_A wird zu einer tangentialen Kraft F_T umgeformt:

$$M_A = F_T \cdot U \quad (4.29)$$

In diesem Fall kann die Umformung U durch den Radius am Teilkreis des Zahnrades R_Z beschrieben werden:

$$U = R_Z \quad (4.30)$$

Infolge der Umformung U entsteht die Reaktionsgröße F_R , die aus dem System geleitet werden muss. Für die Ausleitung der Reaktionsgröße F_R stehen die beiden Lager zur

²⁰⁴ Vgl. Vogel et al. (2019).

²⁰⁵ Roth (2000) S. 82.

Verfügung und der Lastpfad der Reaktionsgröße F_R teilt sich im Knoten in die beiden Lastpfade F_{R1} und F_{R2} auf, die wiederum die Möglichkeit zum Finden von Ersatzgrößen bieten.

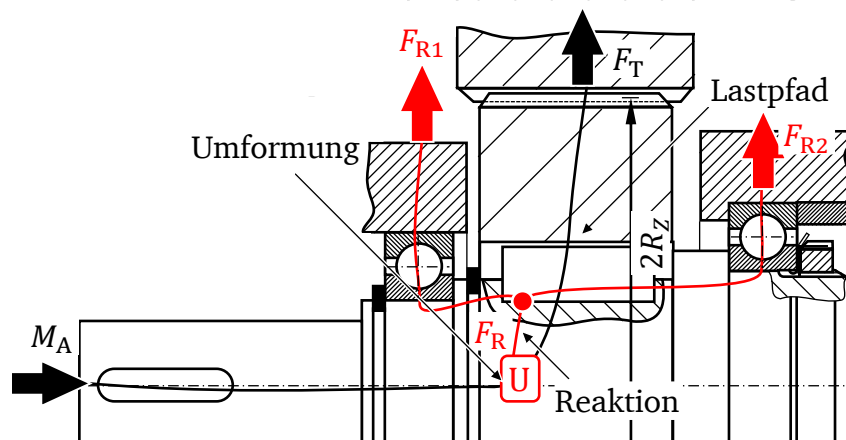


Abbildung 4.25: Umformung und entstehende Reaktionen am Beispiel einer Getriebeausgangswelle.

Wandlung

In Abschnitt 4.2.5 wurde beschrieben, dass eine Wandlung die Art²⁰⁶ der geleiteten Flussgröße verändert. Dies hat zur Folge, dass die Flussgröße nach der Wandlung einer anderen physikalischen Domäne zugeordnet wird. Somit wird die Flussgröße ebenfalls multiplikativ beeinflusst, wie es auch bei der Umformung zu beobachten ist. Wie in Abschnitt 4.2.5 bereits erläutert, müssen die Erhaltungsgleichungen erfüllt werden. Dies hat zur Folge, dass für jede Art einer geleiteten Flussgröße eigene Gleichgewichte erfüllt sein müssen. In der mechanischen Domäne müssen die Bedingungen für die Impuls- und Drehimpulserhaltung und in der elektrischen Domäne die Bedingung der Ladungserhaltung eingehalten werden.

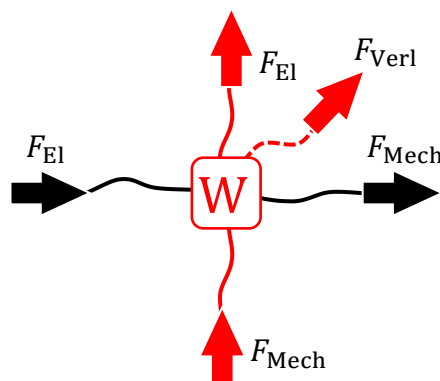


Abbildung 4.26: Das Element Wandeln mit unterschiedlichen Arten von Ein- und Ausgangsgrößen und den notwendigen Reaktionsgrößen.

²⁰⁶ Roth (2000) S. 82.

Abbildung 4.26 zeigt das Element *Wandeln* mit Ein- und Ausgangsgröße und den entstehenden Reaktionsgrößen. Tritt eine elektrische Flussgröße F_{El} in ein System ein und wird in eine mechanische Flussgröße F_{Mech} gewandelt, die das System verlässt, muss ebenfalls eine zusätzliche elektrische Flussgröße das System verlassen und eine zusätzliche mechanische Flussgröße in das System eintreten. Dies ist nötig, um die Bedingungen der Ladungserhaltung und der Impulserhaltung zu erfüllen. Zusätzlich sind Energiewandlungen immer mit dem Verlust der nutzbaren Energie verbunden. Diese Energie wird als Verluststrom häufig in Form eines Wärmestroms aus dem System geleitet. Die Effizienz der Wandlung kann im Zusammenhang der Flussgrößen berücksichtigt werden.

In Abbildung 4.27 ist eine Wandlung am Beispiel eines Elektromotors gezeigt. Die Last wird als Drehmoment T_{M} an der Welle eingeleitet und am Stromkabel als elektrischer Strom I_{M} ausgeleitet. Dazwischen findet eine Wandlung W statt:

$$T_{\text{M}} = I_{\text{M}} \cdot W \quad (4.31)$$

Im Falle eines Gleichstrommotors kann die Wandlung bei bekanntem magnetischem Fluss Φ und bekannter Maschinenkonstante $c(\eta_{\text{W}})$ beschrieben werden²⁰⁷:

$$W = c(\eta_{\text{W}}) \cdot \Phi \quad (4.32)$$

Auf die Darstellung des abzweigenden Wärmestroms infolge des Wirkungsgradverlustes der Wandlung wird in diesem Beispiel verzichtet. Die unvollständige Wandlung wird im Falle des Gleichstrommotors durch die Abhängigkeit der Maschinenkonstante $c(\eta_{\text{W}})$ von der Effizienz η_{W} der Wandlung W abgebildet. Die Reaktionen infolge der Wandlung sind rot dargestellt. Der ausgeleitete Strom I_{M} muss als Reaktion in das System eingeleitet werden. Das eingeleitete Moment T_{M} muss aus dem System ausgeleitet werden. Somit kann die Zielgröße anhand der Ersatzgrößen I_{M} , die in einem der beiden Stromkabel auftreten ermittelt werden. Zusätzlich kann das eingeleitete Moment anhand der mechanischen Reaktion T_{M} gemessen werden, zum Beispiel anhand der Kräfte, die vom Fundament aufgenommen werden.

²⁰⁷ Vgl. Busch (2015) S. 316.

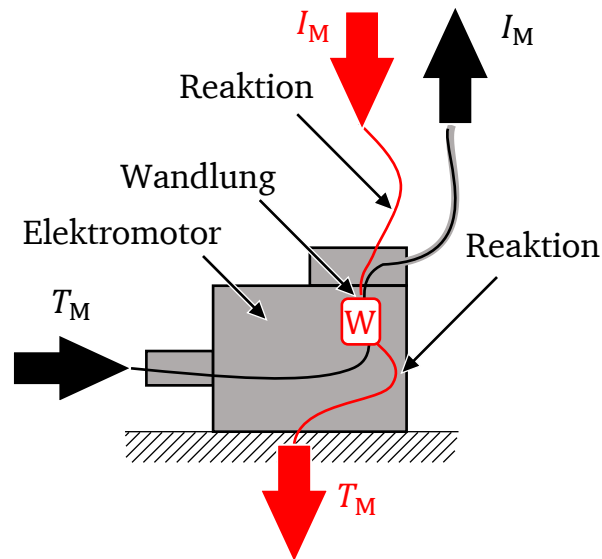


Abbildung 4.27: Wandlung und entstehende Reaktionen am Beispiel eines Elektromotors.

Ein- und Ausleitung der Größen

Die Flussgrößen werden an den Schnittstellen in das betrachtete System eingeleitet und auch wieder ausgeleitet. Diese Schnittstellen entsprechen Wirkflächen von Wirkkörpern oder Wirkräumen, die die Begrenzung des betrachteten Systems bilden. Die Einleitung der Zielgröße und anderer Lasten, die ggf. bereits bekannt sind oder das Signal stören können, werden, wie zum Beispiel in Abbildung 4.27 gezeigt, als Pfeile dargestellt, die in Richtung des Systems zeigen. An den Stellen, an denen diese Lasten ihre direkten Reaktionen erzeugen, treten diese wieder aus dem System aus und können als Pfeile, die vom System weg zeigen, dargestellt werden. Auch Reaktionen, die infolge von Wandlung und Umformung auftreten, besitzen Richtungen. Bei einer Umformung entstehen die Reaktionen in der Umformung und müssen, wie bereits in Abbildung 4.24 gezeigt, das System verlassen. Bei einer Wandlung entstehen Reaktionen, die wie in Abbildung 4.26 ein- und ausgeleitet werden müssen.

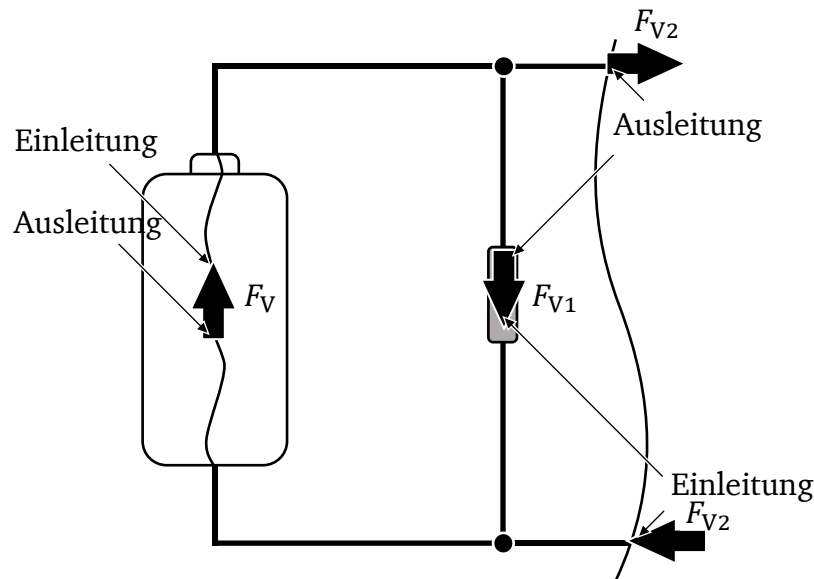


Abbildung 4.28: Ein- und Ausleitung der Flussgröße in ein System bei vorliegender Vorspannung am Beispiel einer Batterie.

Besonderheiten bilden vorhandene Quellen für Flussgrößen im System und beschleunigte Systeme. Bei Quellen befindet sich die Ein- und die Ausleitung der Flussgröße an derselben Stelle des Systems, die auch innerhalb des Systemgrenze liegen kann. Eine Quelle für eine mechanische Flussgröße ist zum Beispiel die Vorspannung von verspannten Bauteilen. Eine Quelle für eine elektrische Flussgröße ist beispielsweise eine systeminterne Stromquelle. Wird das System an der Quelle geschnitten, tritt die Flussgröße an dieser Stelle in das System ein oder aus. Dies ist zum Beispiel bei vorgespannten federnden Bauteilen der Fall: Auf das System wirkt eine Last, ohne dass eine äußere Last angreift. In Abbildung 4.28 ist die gleichzeitige Ein- und Ausleitung und der zugehörige Lastpfad bei einer systeminternen Quelle anhand einer Batterie gezeigt. Die Flussgröße F_V wird am Pluspol der Batterie eingeleitet und am Minuspol aus dem System ausgeleitet. Für die Darstellung der Einleitung der Flussgröße kann jeder Punkt entlang des eindeutigen Lastpfades gewählt werden. Es bietet sich jedoch an, die Quelle an die tatsächliche Ursache der Flussgröße zu platzieren.

Wird eine Flussgröße in ein System eingeleitet und nicht wieder ausgeleitet, wird das System beschleunigt. Bei beschleunigten Systemen werden die Gleichgewichtsbedingungen der Erhaltungsgleichung dadurch erfüllt, dass die Flussgröße in der Beschleunigung des Systems gespeichert wird. Für die Speicherung der mechanischen Flussgröße Kraft gilt:

$$F_{\text{Ein}} = m \cdot \dot{v}_i \quad (4.33)$$

Analog dazu gilt für die Speicherung der elektrischen Flussgröße Strom:²⁰⁸

²⁰⁸ Ballas et al. (2009) S. 82.

$$F_{\text{Ein}} = C \cdot \dot{u}_i \quad (4.34)$$

Abbildung 4.29 zeigt das Element *Speicher* im Zusammenhang einer eingeleiteten und ausgeleiteten Flussgröße. Bevor eine Flussgröße ausgeleitet werden kann, muss diese zu einem früheren Zeitpunkt $t = 0$ eingeleitet worden und gespeichert worden sein.

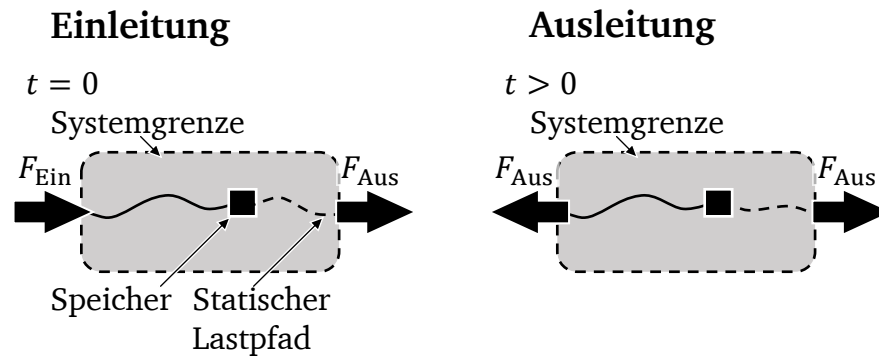


Abbildung 4.29: Element *Speicher* mit *Ein-* und *Ausspeichern* zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

Das Element *Speicher* wird bei der Modellierung schwingender Systeme benötigt, um den Effekt Isolation abbilden zu können. Für eine schwingende Flussgröße, die auf das System wirkt, gilt: Die schwingende Flussgröße wird von der Einleitung zum Speicher geleitet und vom Speicher wieder zur Ausleitung geleitet. So können hochfrequente mechanische und elektrische Schwingungen aufgrund der Trägheiten des Systems im statischen Lastpfad häufig nicht gemessen werden.²⁰⁹ Der Anteil der Flussgröße, die im Speicher gespeichert wird und nicht über den statischen Lastpfad geleitet wird, hängt von den dynamischen Eigenschaften *Eigenfrequenzen* ω_{ei} des Systems ab.

In Abbildung 4.30 ist die Isolation von Flussgrößen am Beispiel eines Einmassenschwingers dargestellt. Wirkt eine schwingende Flussgröße mit einer Frequenz $\omega > \omega_e$ auf den Einmassenschwinger, wird dieser abwechselnd beschleunigt und verzögert. Der Lastpfad führt von der Einleitung in den Impulsspeicher (links) und wieder aus dem Impulsspeicher zur Ausleitung (rechts). Für den Fall keiner vollständigen Isolation führt ein Teil des Lastpfades durch die Feder in das Fundament.²¹⁰ Abbildung 4.31 zeigt den Anteil der Flussgröße, die über den statischen Lastpfad in das Fundament geleitet wird. Oberhalb dem Zweifachen der Eigenfrequenz ω_0 des Systems ist der Anteil der Flussgröße, die über den statischen Lastpfad in das Fundament geleitet wird, gering. Daher müssen bei der Modellierung hochfrequenter Flussgrößen Speicher berücksichtigt werden, um die verschiedenen Positionen von Ersatzgrößen bewerten zu können.

²⁰⁹ Vgl. Martin et al. (2018a) und Deckers (2014).

²¹⁰ Die Ein- und Ausleitung trifft keine Aussage über das Vorzeichen der Last.

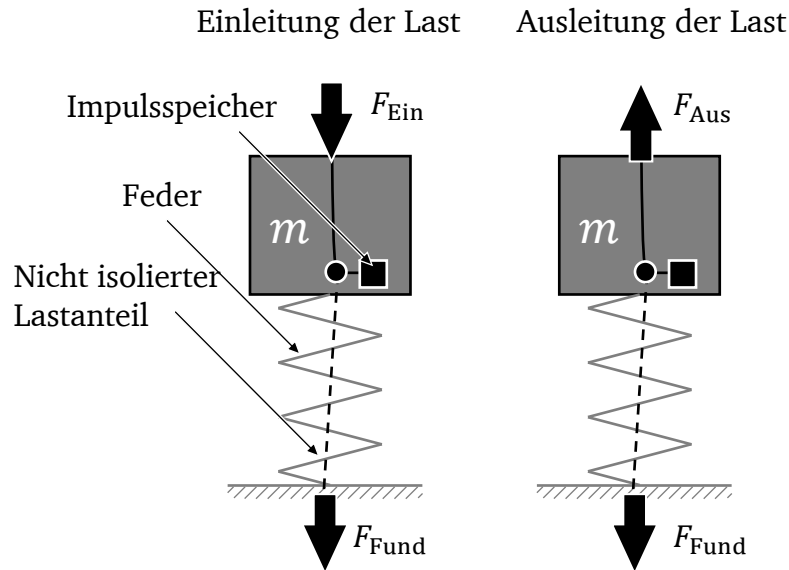


Abbildung 4.30: Lastspeicher am Beispiel der Speicherung des Impulses in beschleunigter Masse.

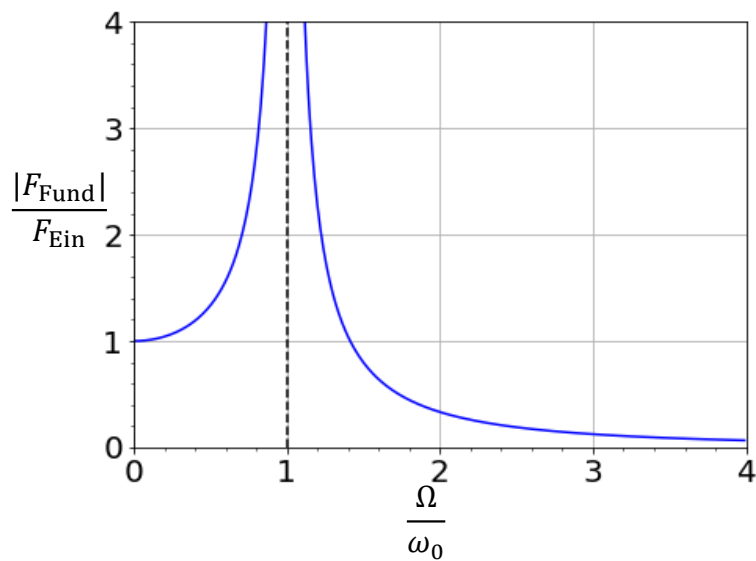


Abbildung 4.31: Anteil der Flussgröße im statischen Lastpfad in Abhängigkeit der Frequenz der eingeleiteten Flussgröße.

4.3.2 Eigenschaften eines Lastpfad- und Knotenmodells

Das Lastpfad- und Knotenmodell eines Systems dient dazu, die Zusammenhänge zwischen der Ziel- und der Ersatzgröße aufzuzeigen und so die Basis für die mathematische Modellbildung der Messkette zu liefern. Entlang des Lastpfades kann immer wieder überprüft werden, ob eine veränderliche Eigenschaft vorliegt, die messbar ist. Werden alternative Eigenschaften oder Messorte gesucht, kann der Fokus auf die Modellierung von Umformungen und Wandlungen gelegt werden, um in den sekundären Lastpfaden nach veränderlichen Eigenschaften zu suchen.

Sind erste Ideen für einen Messort und eine Ersatzgröße gefunden, können diese Ideen hinsichtlich der möglichen Genauigkeit der Messung und der Möglichkeit, diese Komponente weiterzuentwickeln, miteinander verglichen werden. Für die mögliche Genauigkeit muss die mathematische Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Ziel- und Ersatzgröße herangezogen werden. Für die unterschiedlichen Phasen der Weiterentwicklung, in denen unterschiedlich konkrete Informationen vorliegen, müssen die einzelnen Elemente entlang des Lastpfades mathematisch zweckmäßig beschrieben werden. Wie in Abschnitt 4.2.3 bereits beschrieben, sind alle Annahmen über die Größe der Einflussgrößen und deren Zusammenhang unsicherheitsbehaftet. Durch konkretere Informationen, die in späteren Phasen, zum Beispiel auf Grund von Prototypen, vorliegen, werden auch die möglichen Vergleiche der verschiedenen Messorte und Ersatzgrößen konkreter. Die Modellierung mittels Lastpfad- und Knotenmodells führt dazu, dass verschiedene Ersatzgrößen und Positionen, an denen diese Ersatzgrößen gemessen werden können, hinsichtlich verschiedener Aspekte bewertet werden können. Als ein Kriterium für besonders frühe Vergleiche, können die Anzahl an signalmanipulierenden Elementen wie *Knoten*, *Wandlungen* und *Umformungen* herangezogen werden, um die verschiedenen Messorte zu priorisieren.²¹¹ Als ein weiteres Kriterium können die bekannten Toleranzen von Parametern genutzt werden, sodass Messorte, an denen Parameter mit einem großen Toleranzfeld berücksichtigt werden müssen, für die Weiterentwicklung ausgeschlossen werden. Durch die steigende Kenntnis der Zusammenhänge im Verlaufe des Entwicklungsprozesses können die mathematischen Modelle immer weiter präzisiert und schlechter geeignete Lösungen aus dem Lösungsraum entfernt werden.

Für eine endgültige Bewertung der übrig gebliebenen Lösungen muss am Ende das gesamte Modell der Messkette, inklusive der Anbindung des Sensors sowie der Genauigkeit von Sensor und Auswerteeinheit berücksichtigt werden. Auf dem Weg dahin kann das Lastpfad- und Knotenmodell genutzt werden, um Prioritäten innerhalb der Lösungssuche zu setzen und Entscheidungen zu dokumentieren.

²¹¹ Vgl. Vogel et al. (2019) S. 308ff.

5 Evaluation des Lastpfad- und Knotenmodells an bekannten Produkten

In diesem Kapitel wird das Lastpfad- und Knotenmodell anhand von zwei bekannten Produkten evaluiert. Hierfür wird das Modell zunächst an einer Industriescheibenbremse angewendet und geprüft, ob die alternative Messgröße, die in RICHTER ET AL. beschrieben ist,²¹² gefunden werden kann. Anschließend wird das Lastpfad- und Knotenmodell auf eine Flachwalzprofiliermaschine angewendet und geprüft, ob die in OPPEL beschriebenen Ersatzgrößen²¹³ gefunden werden können.

5.1 Sensorische Erweiterung einer Industriescheibenbremse

In diesem Abschnitt wird erst der aktuelle Stand der Bremskraftmessung der in Abbildung 5.1 dargestellten Industriescheibenbremse beschrieben und welche Verbesserung durch die Weiterentwicklung des Produktes erzielt werden soll. Anschließend wird das Lastpfad- und Knotenmodell auf drei verschiedene Zustände angewandt, um anhand der Modellierung Möglichkeiten der Verbesserung der Messung zu erkennen und zu erklären.

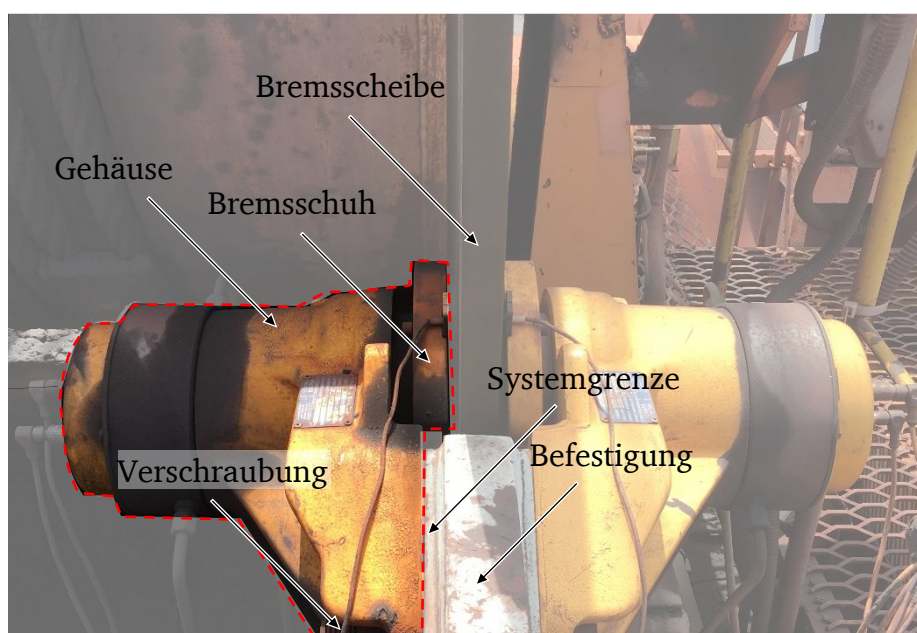


Abbildung 5.1: Industriegewindenebremse inkl. Systemgrenze des weiterzuentwickelnden Systems

5.1.1 Aktueller Stand und Aufgabenbeschreibung

Abbildung 5.2 zeigt eine stark vereinfachte Darstellung einer Industriegewindenebremse. Mehrere Bauteile sind zu den wichtigsten Hauptbauteilen zusammengefasst worden, um die Funktion erläutern zu können: Das Tellerfederpaket wird bei der Montage vorgespannt, sodass der Bremschuh im drucklosen Zustand gegen die Bremscheibe

²¹² Vgl. Richter et al. (2010) S. 8-10.

²¹³ Vgl. Oppel (2008) S. 4-6.

drückt. Das Gehäuse ist an einer Befestigung verschraubt und die Bremskräfte werden über diese Verschraubung an die Befestigung übertragen. Wird hydraulischer Druck angelegt, füllt sich die Druckkammer und dehnt sich aus. Dadurch wird die Zugstange, die mit dem Bremsschuh verbunden ist, bewegt, und die Anpresskraft zwischen Bremsschuh und Bremsscheibe wird verringert.

Aktuell wird die Zielgröße Bremskraft, mit der der Kolben auf die Bremsscheibe gepresst wird, anhand der Ersatzgröße Druck in der Druckkammer gemessen. Bei Abnutzung des Bremsbelags verändern sich der Federweg und die Vorspannung der Tellerfedern. Tellerfedern weisen eine nichtlineare Kennlinie zwischen Vorspannung und Weg auf und die Bremse muss nachgestellt werden. Sonst verliert das Berechnungsmodell für die Berechnung der Axialkraft anhand der Ersatzgröße Druck im Hydraulikkolben seine Gültigkeit. Die Aufgabe der sensorischen Weiterentwicklung besteht darin, alternative Ersatzgrößen zu finden, die eine robustere Messung der Axialkraft ermöglichen, die unabhängig von der Abnutzung des Bremsbelags ist.

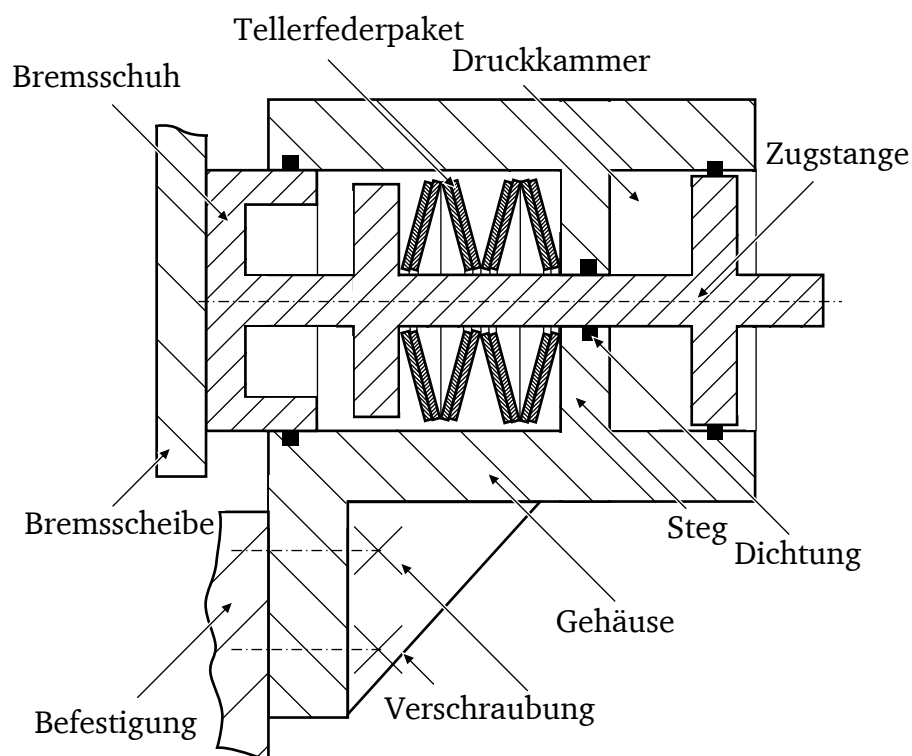


Abbildung 5.2: Vereinfachte Darstellung einer hydraulischen Industriescheibenbremse.

5.1.2 Bilden des Lastpfad- und Knotenmodells

Als erstes werden die wesentlichen Zustände der Bremse identifiziert. Im drucklosen Zustand wirkt die Vorspannung der Tellerfedern. Die Last wird durch die Vorspannung der Federn in das System eingeleitet. Der Lastpfad führt in die Kolbenstange und wird als axiale Druckbelastung in axialer Richtung F_{Ax} bis an die Wirkfläche des Bremsschuhs ge-

leitet. An dieser Wirkfläche wird die Last aus dem System geleitet. Zur Erfüllung der Impulserhaltung muss mindestens eine weitere Last in das System eingebracht werden, die an der Vorspannung der Federn wieder ausgeleitet wird. Da der Ort, an dem sie ausgeleitet wird, bekannt ist, kann von diesem Ort ausgegangen werden und entgegen der Richtung des Lastpfades vorgegangen werden. Die Last der Federn wirkt auf den Steg des Gehäuses. Von der Wirkflächenpaarung zwischen Steg und Federn wird die Last zwischen den Umformungen U_1 und U_2 als Biegemoment M_{Bie} durch den Steg an die Grundstruktur des Gehäuses geleitet. Die Grundstruktur des Gehäuses ist als Hohlzylinder ausgeführt. Dies führt dazu, dass die Last als axiale Zugbelastung F_{Ax} durch den Hohlzylinder in Richtung der Befestigung geleitet wird. Da die Befestigung nicht symmetrisch ist und zwischen Einleitung der Last F_{Vor} und der axialen Zugbelastung F_{Ax} ein Hebelarm existiert, wird die Last als Biegemoment M_{Bie} innerhalb der Befestigung geleitet und als solches an der Wirkfläche der Befestigung in das System eingeleitet. In Abbildung 5.3 ist das Ergebnis der Modellierung des geschlossenen Zustands der Bremse, anhand des Lastpfad- und Knotenmodells dargestellt, wobei die Umformung von axialer Last und Biegung innerhalb der Tellerfedern für diese Analyse vernachlässigt wird. Ebenfalls werden die Reibungen in den Dichtungen und Führungen vernachlässigt.²¹⁴ Die Reaktionen, die aufgrund der Umformungen U_1 und U_2 innerhalb des Steges des Gehäuses entstehen, gleichen sich gegenseitig aus und wirken nur zwischen diesen beiden Umformungen. Die Reaktion F_{Re} der Umformung U_3 wird durch eine zusätzliche Last, die an der Wirkfläche der Befestigung ausgeleitet wird, ausgeglichen.

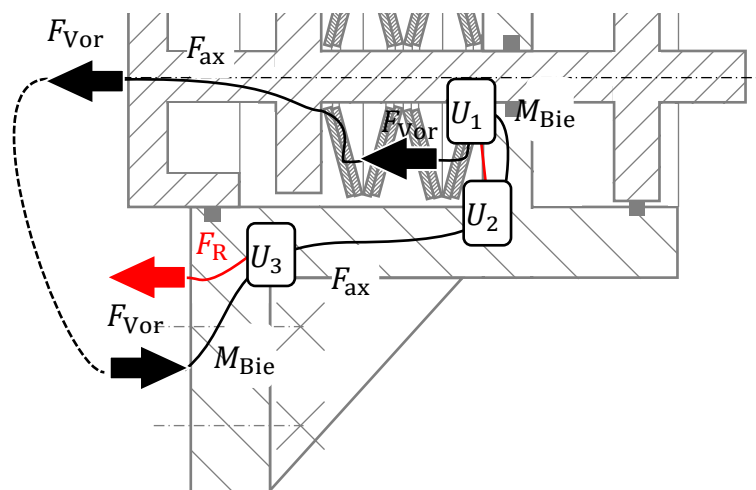


Abbildung 5.3: Modellierung des drucklosen Zustandes mittels Lastpfad- und Knotenmodell. Schwarz: primärer Lastpfad; Rot: Lastpfad infolge der Reaktionen.

Im zweiten Zustand ist die Bremse geöffnet. Die Last wird in der Druckkammer als Druck eingeleitet. Am Wirkflächenpaar des Öls und der Zugstange W_1 wird der Druck in eine axiale Zugbelastung F_{Ax} gewandelt, die auf die Zugstange wirkt. Die Last wird dann

²¹⁴ Die Reibung in den Führungen und Dichtungen erzeugt Verzweigungen des Lastpfades, die jedoch vernachlässigbar klein im Vergleich zu den anderen geleitet Kräften sind.

als Zugbelastung durch die Zugstange geleitet. Am Wirkflächenpaar von Zugstange und Tellerfedern wird die Last in die Tellerfedern eingeleitet und durch diese als Druckkraft an das Wirkflächenpaar der Tellerfedern und des Gehäuses geleitet. Durch den Steg des Gehäuses wird die Last als Druckkraft bis zur Druckkammer geleitet und dort wieder zum Druck W_2 gewandelt. In der Druckkammer wird der Druck wieder ausgeleitet. In Abbildung 5.4 ist das Ergebnis dieser Modellierung dargestellt. Die Reaktion R_1 und R_2 infolge des Drucks wird durch das Gehäuse als radiale Kraft über den gesamten Umfang des Gehäuses geleitet. Aufgrund der Achssymmetrie werden die Reaktionen entlang des Umfangs von den anderen Wandlungen ausgeleitet.

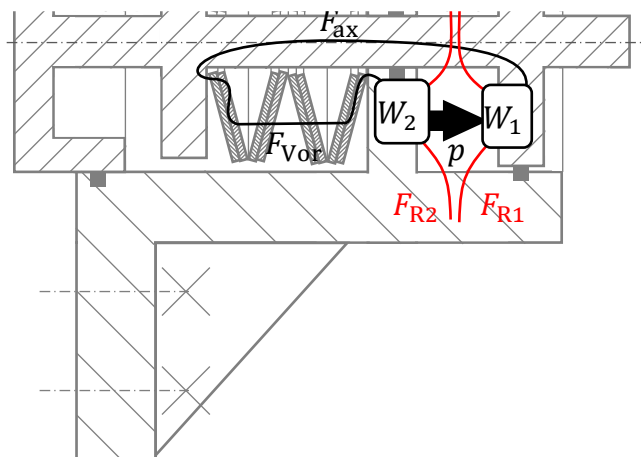


Abbildung 5.4: Modellierung des geöffneten Zustandes mittels Lastpfad- und Knotenmodell. Schwarz: primärer Lastpfad; Rot: Lastpfad infolge der Reaktionen.

Der dritte Zustand ist der Zustand, in dem die Bremskraft geregelt wird. Dieser Zustand befindet sich zwischen den beiden vorher erläuterten Extremzuständen. Das Lastpfad- und Knotenmodell für den Zwischenzustand ergibt sich aus der Überlagerung der beiden Extremzustände und ist in Abbildung 5.5 gezeigt. Die Bremskraft tritt als Zielgröße F_{Ziel} an der Wirkfläche des Bremskolbens in das System ein. Innerhalb der Zugstange wird sie als axiale Druckbelastung F_{Ax} zum Knoten K_1 geleitet und teilt sich auf die beiden parallelen Lastpfade LP_1 und LP_2 auf. Der Lastpfad LP_2 führt durch die Tellerfedern zum Knoten K_2 , an dem sich die beiden parallelen Lastpfade LP_1 und LP_2 wieder vereinigen. Der Lastpfad LP_1 führt entlang der Zugstange und die Zielgröße wird an der Wandlung W_1 erst in Druck gewandelt, um anschließend an der Wandlung W_2 wieder in eine Kraft gewandelt zu werden. Von der Wandlung W_2 führt der Lastpfad LP_1 zum Knoten K_2 , um von dort wieder als gesamter Lastpfad die Zielgröße als axiale Zugbelastung F_{Ax} durch das Gehäuse zu leiten. An der Befestigung wird die Zielgröße wieder umgeformt und tritt aus dem System heraus. Der Drucksensor liegt hierbei im Lastpfad LP_1 und misst die Zielgröße anhand der gewandelten Ersatzgröße Druck p . Zwischen der Zielgröße F_{Ziel} und Ersatzgröße p liegt der Knoten K_1 und die Wandlung W_1 . Für die Berechnung der Zielgröße anhand der Ersatzgröße müssen die Eigenschaften der beiden Elemente mit der gemessenen Ersatzgröße p multipliziert werden:

$$F_{\text{Ziel}} = K_1 \cdot W_1 \cdot p \quad (5.1)$$

mit

$$K_1 = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$$

und

$$W_1 = A_{\text{Kolben}}$$

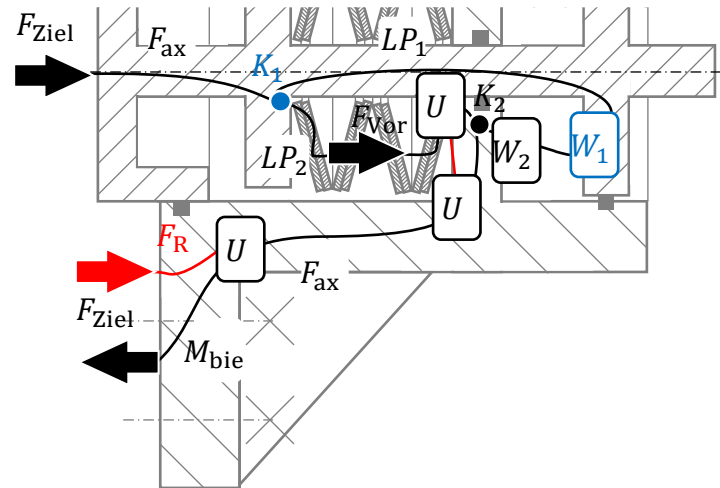


Abbildung 5.5: Modellierung des geregelten Zustandes mittels Lastpfad- und Knotenmodell. Schwarz: Primärer Lastpfad; Rot: Lastpfad infolge der Reaktionen; Blau: Elemente, die im Lastpfad der Messung liegen.

5.1.3 Analyse des Lastpfad- und Knotenmodells und Ableitung von Erkenntnissen

Um das in Abbildung 5.5 gezeigte Lastpfad- und Knotenmodell zu analysieren, werden nun die zu berücksichtigenden Elemente einzeln betrachtet. Für die Aufteilung des Knotens K_1 wird das Modell von parallel geschalteten Federn verwendet. Diese modellhafte Beschreibung vernachlässigt keine signifikanten Effekte und ist keine große Unsicherheitsquelle. Auch die Beschreibung der Wandlung W_1 von Kraft zu Druck ist bekannt und keine große Quelle von Unsicherheit. Als nächstes werden die Parameter, von denen die Aufteilung K_1 und die Wandlung W_1 abhängen, betrachtet. Der Einfluss der einzelnen Parameter auf das Modell der Auswertung in (5.1) kann anhand der Toleranz der einzelnen Parameter und der Stärke der Parameter bestimmt werden. Aus den bestehenden Kenntnissen des aktuellen Produktes ist bekannt, dass die Steifigkeit der Tellerfedern und damit die Steifigkeit c_2 des Lastpfades LP_2 sehr starke Schwankungen aufweist und zusätzlich eine Abhängigkeit des Federweges und somit der Abnutzung des Bremsbelages aufweist. So kann die Aufteilung im Knoten K_1 - genauer die Steifigkeit c_2 - als größte Quelle der Unsicherheit identifiziert werden. Für eine Verbesserung der Robustheit und damit der Genauigkeit der Messung kann die Unsicherheit bezüglich der Steifigkeit c_2 verringert werden, indem sie zum Beispiel zusätzlich gemessen wird oder weitere Maßnahmen für eine Verringerung der Schwankung infolge von Toleranzen ergriffen werden. Eine weitere Möglichkeit der Verbesserung kann eine Ersatzgröße bieten, bei der der Knoten

K_1 nicht berücksichtigt werden muss. Als Ort für die alternativen Messgrößen kommt der Bereich zwischen der Wirkfläche des Bremskolbens und des Knoten K_1 in Frage. Zusätzlich kommt der Bereich in der Grundstruktur des Gehäuses in Frage,²¹⁵ da die beiden parallelen Lastpfade im Knoten K_2 wieder vereinigt werden. Das mathematische Modell für den Zusammenhang für die Berechnung der Zielgröße F_{Ziel} anhand der Ersatzgröße der Dehnung in der Grundstruktur des Gehäuses ε ergibt sich dann zu:

$$F_{\text{Ziel}} = \pi(r_a^2 - r_i^2) \cdot E_{\text{Gehäuse}} \cdot \varepsilon \quad (5.2)$$

Die Parameter dieses mathematischen Zusammenhangs weisen eine geringere Streuung als die in Gleichung (5.1) präsentierten. Ohne weitere Maßnahmen weist diese Messung daher eine geringere Gesamtunsicherheit auf, ohne dabei die Gestalt der Primärfunktion zu verändern und somit die bestehende Funktion zu gefährden.

Störeffekte, wie zum Beispiel Temperaturänderungen, die auf den Sensor wirken, werden hier nicht betrachtet und bedürfen einer separaten Überprüfung. Ebenfalls entstehen bei der Berücksichtigung von Reibung in den Dichtungen und Führungen weitere Knoten, die eine weitere Aufteilung des Lastpfades verursachen. Je mehr Effekte im Lastpfad- und Knotenmodell berücksichtigt werden, desto genauer wird die Aussage über die Unsicherheit der verschiedenen Ersatzgrößen. Aber auch die Komplexität steigt mit der Anzahl der zu berücksichtigenden Effekte und der Granularität, mit der das System aufgelöst wird. Die in MATTHIESEN präsentierten Techniken²¹⁶ zur Überwindung der Beobachtungsbarrieren in der Analyse können auch für das Lastpfad- und Knotenmodell angewendet werden, um eine Hilfestellung bei der Auswahl der richtigen Granularität zu bieten.

5.2 Prozessüberwachung in einer Flachwalzprofiliermaschine

In diesem Abschnitt wird zuerst die bestehende Konstruktion einer Flachwalzprofiliermaschine erläutert und welche Größen gemessen werden sollen. Anschließend wird das Lastpfad- und Knotenmodell auf die drei möglichen Kräfte, die auftreten können, angewendet. Aufbauend auf die Modellierung werden die Erkenntnisse und mögliche Ersatzgrößen abgeleitet und mit den aus der Literatur bekannten Lösungen verglichen.

5.2.1 Aktueller Stand und Aufgabenbeschreibung

Abbildung 5.6 zeigt einen Schnitt durch eine Flachbackenprofilwalze. Der Rohling wird zwischen die beiden Walzbacken gebracht. Durch eine Bewegung des Backenkorbs des Schlittens in die Schnittebene rollt der Rohling über die beiden Walzbacken und das Profil wird in den Rohling eingepreßt. Der Schlitten gleitet dabei im Rahmen. Der feste Backenkorb liegt auf der Backenkorblagerung auf und wird durch Einstellschrauben positioniert. Durch die Verstellung der Einstellschrauben kann der Winkel des feststehenden Backenkorbs eingestellt werden, um die Feineinstellung des Walzprozesses vorzunehmen.

²¹⁵ Siehe Richter et al. (2010).

²¹⁶ Vgl. Matthiesen (2020) S. 27-28.

Trifft das bereits geprägte Profil nach einer 180°-Drehung nicht korrekt auf die gegenüberliegende Backe, wird das bereits geprägte Profil zerstört und das resultierende Produkt ist unbrauchbar. Hierbei entstehen Kräfte in y-Richtung, die genutzt werden können, um fehlerhafte Produkte auszusortieren.²¹⁷ Ziel der sensorischen Weiterentwicklung ist die Erkennung von auftretenden vertikalen Kräften innerhalb des Walzprozesses.

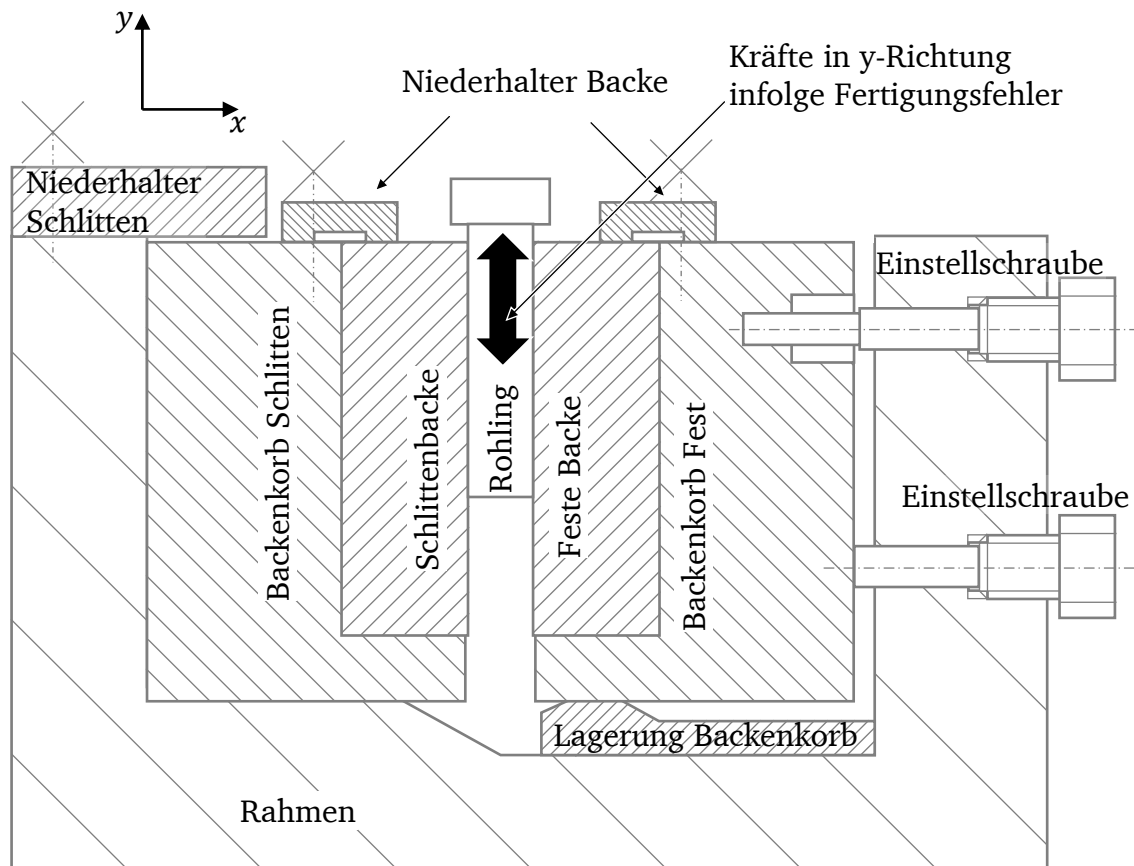


Abbildung 5.6: Beschreibung der Komponenten der Flachwalzprofiliermaschine.²¹⁸

5.2.2 Bilden des Lastpfad- und Knotenmodells

Je nach Ausprägung des Walzfehlers entsteht ein Kippmoment in die Schnittebene oder aus der Schnittebene heraus. Diese beiden Zustände müssen getrennt betrachtet werden. Abbildung 5.7 zeigt das Lastpfad- und Knotenmodell für ein Kippmoment, das aus der Schnittebene heraus zeigt. Auf die feste Backe wirkt eine nach oben gerichtete Kraft. Die Einleitung der Last durch den Rohling ist durch die Pfeilspitze gekennzeichnet. Der Lastpfad teilt sich innerhalb der festen Backe im Knoten K_1 auf und führt einerseits form-schlüssig über den Niederhalter in den Backenhalter. Zusätzlich wird die Last aufgrund der Anpresskraft zwischen Backe und Backenkorb reibkraftschlüssig von der Backe auf den

²¹⁷ Siehe Oppel (2008) S. 5

²¹⁸ Bildquelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Oppel (2008) S. 7.

Backenkorb übertragen. Innerhalb des Backenkorbes werden die beiden Lastpfade im Knoten K_2 wieder zusammengeführt. Anschließend wird die Last in die obere Einstellschraube geleitet und innerhalb der Schraube als Biegung bis zum Rahmen geleitet. Der Rahmen leitet die Last zum Schlitten. Am Knoten K_3 teilt sich der Lastpfad auf und wird wieder teilweise formschlüssig durch die Unterseite des Backenkorbes und reibkraftschlüssig durch die Rückseite des Backenkorbes in den Backenkorb geleitet. Innerhalb des Backenkorbes vereinigt sich der Lastpfad im Knoten K_4 , um im Knoten K_5 wieder aufgeteilt zu werden, um die Last teils form- und teils reibkraftschlüssig an die Backe zu übertragen. Innerhalb der Backe wird der Lastpfad wieder im Knoten K_6 vereint. Von der Backe wird die Last wieder an den Rohling abgegeben und durch das Pfeilende des einleitenden Pfeils gekennzeichnet. Alternativ führt der Beginn der Bildung des Lastpfad- und Knotenmodells mit der Annahme einer nach unten gerichteten Kraft auf die linke Backe zu dem gleichen Resultat.

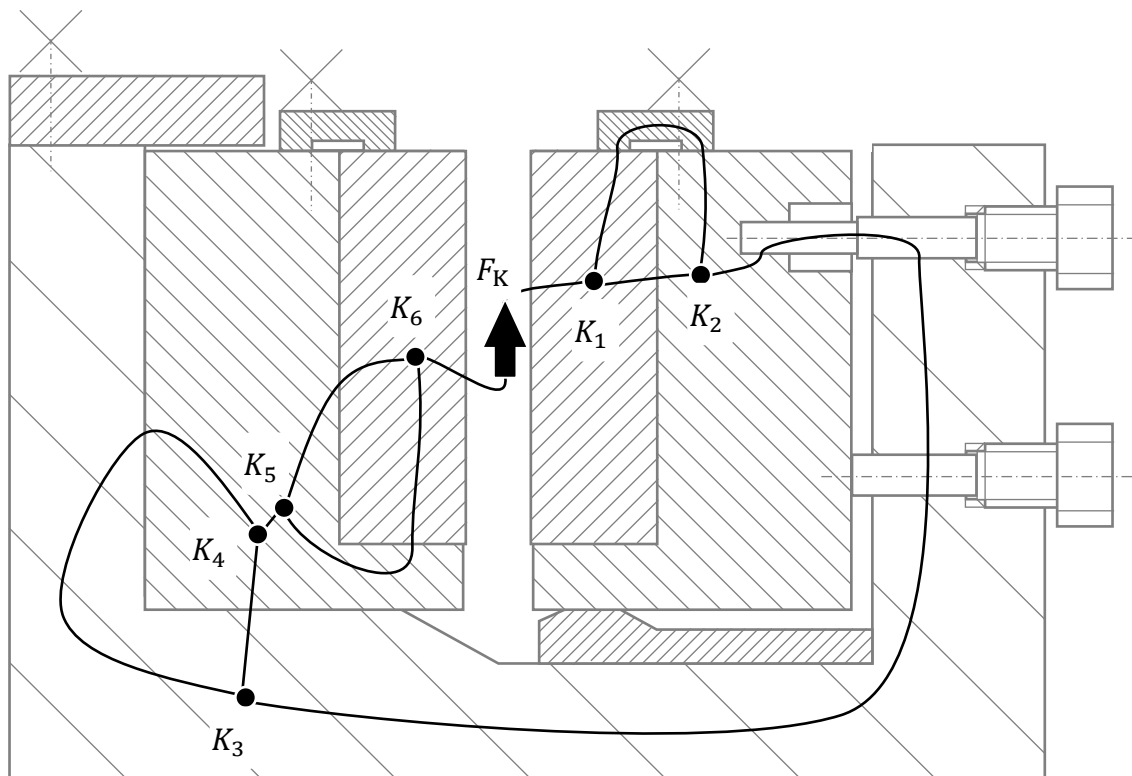


Abbildung 5.7: Lastpfad- und Knotenmodell für Kippmoment aus der Schnittebene heraus.²¹⁹

Abbildung 5.8 zeigt das Lastpfad- und Knotenmodell für ein Kippmoment, das in die Schnittebene zeigt. Hierbei wirkt eine nach oben gerichtete Kraft auf die linke Backe. Wie auch für die rechte Backe, wird die Last teilweise über den Niederhalter und über die Rückseite an den Backenkorb übertragen. Der Backenkorb wird in Folge der Last ausgelenkt, bis dieser den Niederhalter berührt. Dadurch teilt sich der Lastpfad im Knoten K_3

²¹⁹ Bildquelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Oppel (2008) S. 7.

auf und führt sowohl formschlüssig über den Niederhalter als auch reibkraftschlüssig über die Rückwand in den Rahmen. Im Rahmen verbinden sich die beiden Lastpfade wieder im Knoten K_4 und führen durch das Lager des festen Backenkorb in den Backenkorb. Im festen Backenkorb wird der Lastpfad im Knoten K_5 wieder aufgeteilt und form- und reibkraftschlüssig an die Backe übertragen, wo er im Knoten K_6 wieder zusammengeführt wird. Von der Backe wird die Last an den Rohling abgegeben und verlässt das betrachtete System. Auch hier führt der Beginn mit einer nach unten gerichteten Kraft auf die rechte Backe zum selben Resultat.

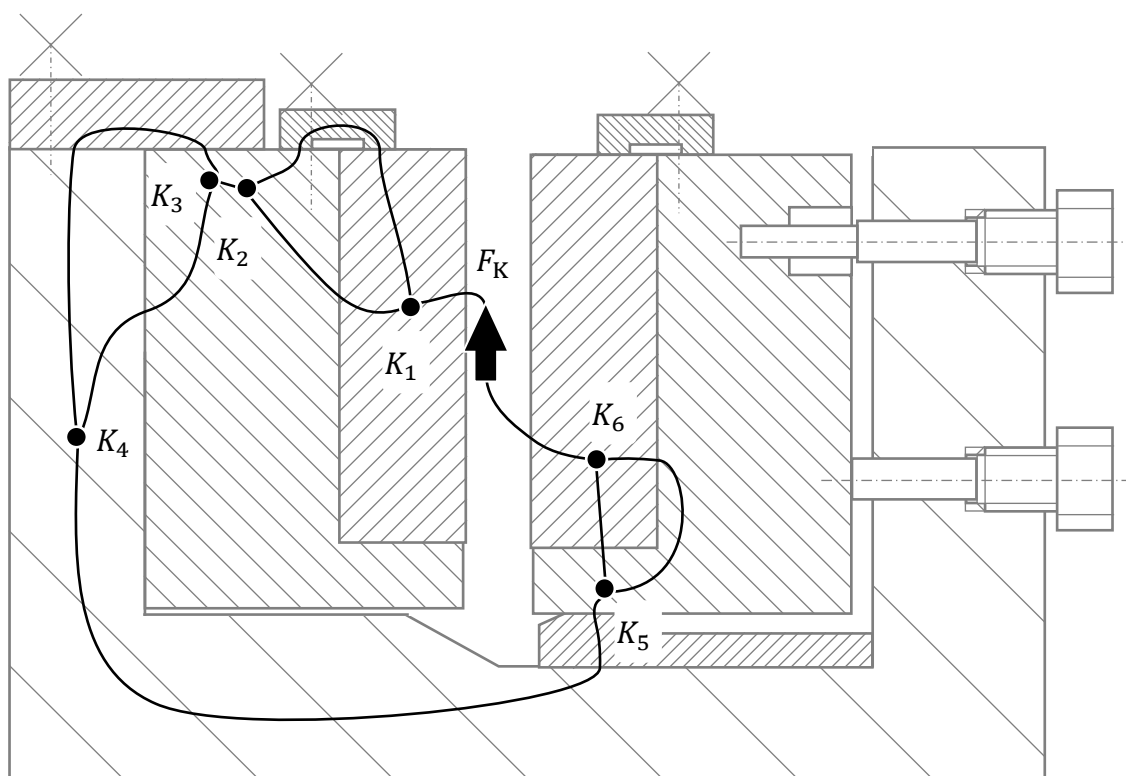


Abbildung 5.8: Lastpfad- und Knotenmodell für Kippmoment in die Schnittebene herein.²²⁰

Abbildung 5.9 zeigt das Lastpfad- und Knotenmodell für die Walzkraft. Die Kraft wirkt horizontal auf die rechte Walzbacke, in der sich der Lastpfad im Knoten K_1 aufteilt. Von dort wird die Last reibkraftschlüssig, infolge der Verspannung des Niederhalters, durch die Unterseite und den Niederhalter an den Backenkorb geleitet. Zusätzlich wird die Last formschlüssig durch die Rückseite der Backe geleitet. Im Backenkorb wird der Lastpfad in den Knoten K_3 und K_4 teilweise wieder zusammengeführt, aber auch im Knoten K_2 auf die beiden Einstellschrauben aufgeteilt. Durch die Gewinde der beiden Einstellschrauben führt der Lastpfad zum Knoten K_5 , um von dort durch den Rahmen zum Schlitten zu führen. Im Schlitten teilt sich der Kraftfluss im Knoten K_6 wieder auf und führt wie auf der rechten Seite sowohl reibkraft-, als auch formschlüssig in den Knoten K_7 innerhalb

²²⁰ Bildquelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Oppel (2008) S. 7.

der Backe. Auch hier kann durch die Annahme einer nach links gerichteten Kraft auf die linke Backe das gleiche Resultat erzielt werden.

Für einen fehlerfreien Fertigungsprozess liegt lediglich der in Abbildung 5.9 gezeigte Zustand vor. Für einen fehlerhaften Fertigungsprozess wird dieser Zustand von einem der in Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 gezeigten Zustände überlagert.

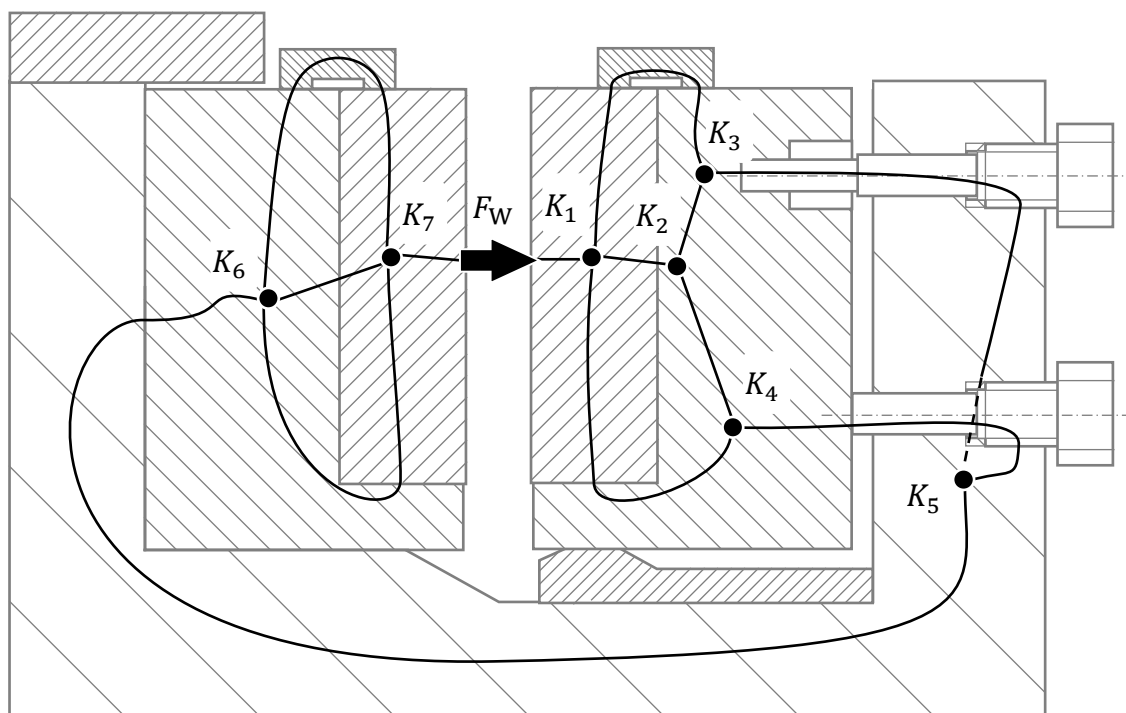


Abbildung 5.9: Lastpfad- und Knotenmodell für die horizontale Walzkraft.²²¹

5.2.3 Analyse des Lastpfad- und Knotenmodells und Ableitung von Erkenntnissen

Aus der Analyse der Lastpfad- und Knotenmodelle zeigt sich, dass es keine Stelle im bestehenden System gibt, an der beide fehlerhaften Zustände Reaktionen hervorrufen, ohne dabei von der Prozesskraft F_W überlagert zu werden. Für die Positionierung eines Sensors in Backe und Backenkorb muss die Reaktion infolge der vertikalen Last unabhängig der Reaktion der horizontalen Last messbar sein. Sonst können die durch die horizontalen Lasten verursachten Reaktionen die Ersatzgröße beeinflussen und zu Fehlinterpretationen führen. Zusätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die horizontalen Kräfte größer als die vertikalen Kräfte ausfallen und somit eine kleine Reaktion messbar sein muss, während die überlagernden Reaktionen deutlich größer sind. Außerhalb der Backen und des Backenkorbcs werden für die Erkennung der Zustände mindestens zwei Sensoren notwendig sein, da es bis auf das untere Joch, das die beiden Seiten des Rahmen verbindet, keine Stelle gibt, an der beide fehlerhafte Zustände eine Reaktion erzeugen. So wird min-

²²¹ Bildquelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Oppel (2008) S. 7.

destens eine Stelle für die Erfassung des in Abbildung 5.7 gezeigten Zustandes und mindestens eine weitere Stelle für die Erfassung des in Abbildung 5.8 gezeigten Zustandes benötigt.

Für die Erkennung eines Kippmoments, das aus der Schnittebene heraus zeigt, bietet es sich an, in dem Bereich der oberen Einstellschraube das Biegemoment als Ersatzgröße zu erfassen. Dieser Bereich wird in Abbildung 5.10 dargestellt. Hier liegt kein paralleler Lastpfad vor, aber der Vergleich von Abbildung 5.7 und Abbildung 5.9 liefert jedoch eine Überlagerung des Lastpfades infolge der vertikalen Kraft mit dem Lastpfad infolge der horizontalen Kraft. Für die Modellierung des Zusammenhangs der Zielgröße *vertikale Kraft* und der Ersatzgröße *Biegespannung* an der Einstellschraube muss die Spannung infolge der horizontalen Kraft berücksichtigt werden.

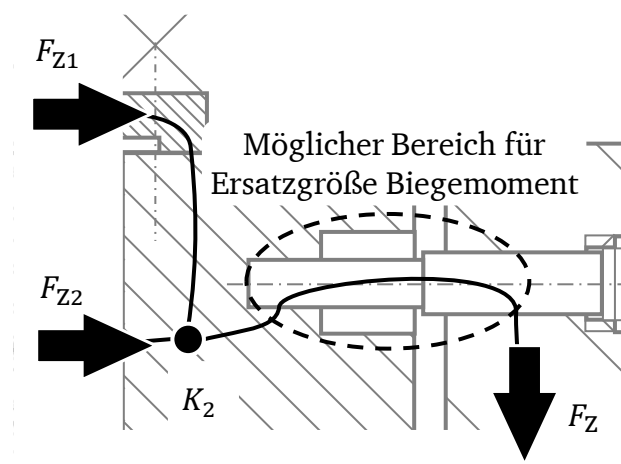


Abbildung 5.10: Ausschnitt für möglichen Bereich einer Messung des Biegemomentes als Ersatzgröße.

Dadurch, dass die Relativbewegung zwischen Schlitten und Rahmen geschmiert stattfindet, kann davon ausgegangen werden, dass die in Abbildung 5.11 gezeigte Aufteilung zwischen den Knoten K_3 und K_4 immer vorliegt und die Last zu keinem Zeitpunkt vollständig über die Rückenseite des Backenkorbs übertragen wird. Somit kommt es immer zu einer formschlüssigen Lastübertragung zwischen dem Boden des Backenkorbes und des Rahmens. Daher kann auch an dieser Stelle, die in Abbildung 5.11 hervorgehoben ist, ein drucksensitiver oder dehnungssensitiver Sensor eingebracht werden, um die Druckspannungen an dieser Stelle als Ersatzgröße zu erfassen. Hierbei muss jedoch die Aufteilung zwischen den Knoten K_3 und K_4 berücksichtigt werden. Die Aufteilung in K_3 wird von der geschmierten Gleitreibung zwischen Backenkorb des Schlittens und dem Rahmen beeinflusst und ist eine Quelle für Unsicherheit. Für den Fall, dass lediglich ein Auftreten des fehlerhaften Zustandes gemessen werden soll, kann auf die Berücksichtigung des Knotens K_3 verzichtet werden. Es muss jedoch sichergestellt sein, dass der Anteil des Lastpfades immer ausreichend groß für die Sensitivität des gewählten Sensors ist.

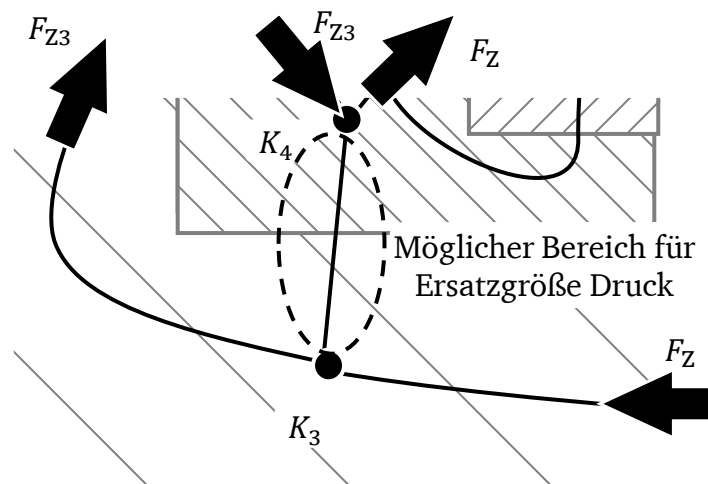


Abbildung 5.11: Ausschnitt für den möglichen Bereich einer Messung des Drucks als Ersatzgröße.

Für das Auftreten des fehlerhaften Zustandes, der in Abbildung 5.8 gezeigt ist, zeigen die zwei bereits vorgestellten Bereiche keine Reaktionen. Daher bieten sich diese Positionen auch nicht für die Erkennung des Auftretens dieses Zustandes an. Für den in Abbildung 5.8 gezeigten Zustand wird deutlich, dass der Lastpfad ohne parallele Lastpfade durch das Backenkorblager für die feste Backe führt. Abbildung 5.12 zeigt den Bereich der Backenkorblagerung, die aufgrund des eindeutigen Lastpfades für die Messung des Druckes als Ersatzgröße in Frage kommt.

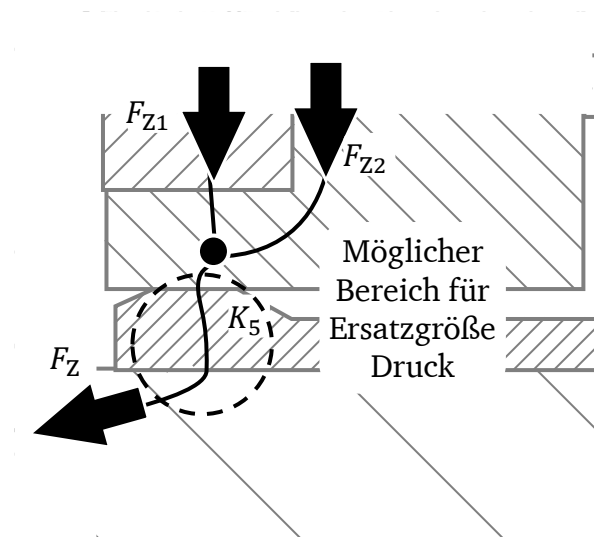


Abbildung 5.12: Ausschnitt für den möglichen Bereich einer Messung des Drucks als Ersatzgröße.

Ein weiterer Bereich, der für die Messung einer Ersatzgröße in Frage kommt, ist in Abbildung 5.13 dargestellt. Hier verzweigt sich der Lastpfad, doch wie auch schon für den

Bereich, der in Abbildung 5.11 gezeigt ist, kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der vorherrschenden Reibbedingung zu jedem Zeitpunkt eine Aufteilung im Knoten K_3 stattfindet und somit beim Auftreten des fehlerhaften Zustandes eine Reaktion gemessen werden kann.

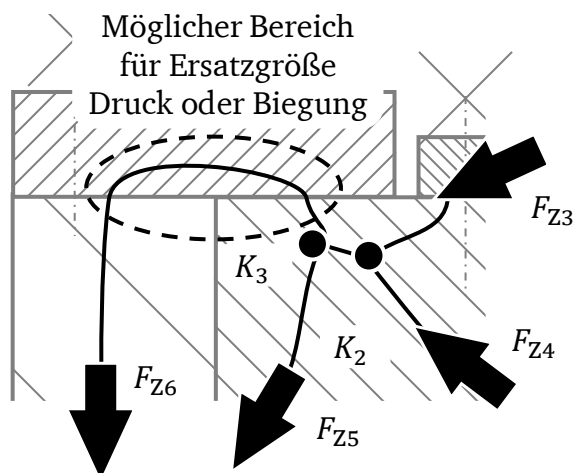


Abbildung 5.13: Ausschnitt für den möglichen Bereich einer Messung des Drucks oder der Biegung als Ersatzgröße.

In OPPEL wird eine Flachbackenprofilwalze mit verschiedenen Sensoren gezeigt.²²² Auch hier wird darauf hingewiesen, dass mindestens zwei Sensoren notwendig sind, um beide fehlerhaften Zustände erkennen zu können.²²³ Die präsentierten Sensoren und Sensorpositionen decken sich mit den in diesem Kapitel diskutierten Optionen der Bereiche, in denen Ersatzgrößen gemessen werden können. Zusätzlich wird in OPPEL ein zusätzlicher, vorgespannter Niederhalter für den festen Backenkorb gezeigt, der einen parallelen Lastpfad zum Biegemoment auf die Einstellschraube liefert.²²⁴ Dieser in Abbildung 5.14 gezeigte parallele Lastpfad führt dazu, dass der Lastpfad entlang der Einstellschraube nicht eindeutig ist, dadurch aber eine weitere Ersatzgröße, die Biegung des Niederhalters, gemessen werden kann.

Die in OPPEL präsentierten Ersatzgrößen konnten ebenfalls mittels Anwendung des Lastpfad- und Knotenmodells als vielversprechende Positionen für die Messung einer Ersatzgröße identifiziert werden. Lediglich die in Abbildung 5.14 gezeigte Position konnte nicht gefunden werden, da hierfür Anpassungen an der Gestalt der Primärfunktion durchgenommen wurden.

²²² Siehe Oppel (2008) S. 7.

²²³ Siehe Oppel (2008) S. 4.

²²⁴ Siehe Oppel (2008) S. 7.

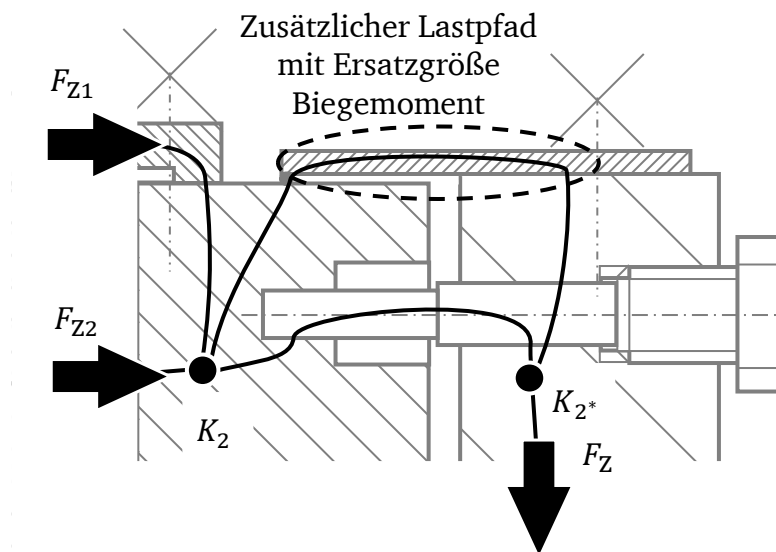


Abbildung 5.14: Ausschnitt für die Erzeugung eines zusätzlichen Lastpfades, dessen Reaktionen als Ersatzgröße gemessen werden können.

6 Evaluation des Lastpfad- und Knotenmodells anhand einer Probandenstudie

In diesem Kapitel wird eine Probandenstudie diskutiert, in der die Wirkung der Kenntnis des Lastpfad- und Knotenmodells überprüft wird. Das Ziel der Studie ist der Nachweis, dass die Anwendung bzw. die Kenntnis des in Abschnitt 4.3 vorgestellten Lastpfad- und Knotenmodells die Konzeptentwicklung verbessert. Als messbares Erfolgskriterium wird das Systemverständnis herangezogen, das anhand der Bewertung von Aufgaben, die die ProbandInnen während der Studie bearbeiten müssen, gemessen wird.

6.1 Studiendesign

Die Studie wird als Crossover-Studie, die in Abbildung 6.1 schematisch dargestellt ist, durchgeführt. Die ProbandInnen werden hierbei nach der Einleitung, in der die Rahmenbedingungen und organisatorische Fragen geklärt werden, in zwei Gruppen aufgeteilt. Gruppe A erhält als Aufgabe 1 die sensorische Weiterentwicklung einer Industriescheibenbremse. Gruppe B erhält als Aufgabe 1 die sensorische Weiterentwicklung eines Schiebers. Nach Beendigung der ersten Aufgabe erhalten die ProbandInnen einen Fragebogen, mit dem der Kenntnisstand zu den Analysemodellen C&C²-Modell und dem Modell des Kraftflusses abgefragt wird. Dies dient dazu, mögliche Verbesserungen und Verschlechterungen anhand vorliegender Erfahrung über die genannten Modelle erklären zu können. Anschließend wird allen ProbandInnen das Lastpfad- und Knotenmodell vorgestellt. Im Rahmen der Vorstellung erhalten die ProbandInnen eine kurze Schulung im Umgang mit dem Modell. Im Anschluss an die Schulung werden die zwei Übungsaufgaben Presse 1 und Presse 2 von allen Teilnehmern des Durchgangs mit Unterstützung des Studienleiters bearbeitet. Hierdurch soll Sicherheit in der Anwendung des Modells geschaffen werden. Dies soll sicherstellen, dass die ProbandInnen Erfahrung im Umgang mit dem Modell besitzen und eine fehlende Verbesserung auf eine fehlende Wirksamkeit des Modells und nicht auf die fehlende Erfahrung mit diesem Modell zurückzuführen ist. Zum Schluss bearbeiten die Gruppen die jeweils andere Aufgabe aus der 1. Aufgabenstellung. Zuletzt erhalten die ProbandInnen einen weiteren Fragebogen, in dem die gefühlte Schwierigkeit, die Neuheit der vermittelten Inhalte, die durch die Schulung verursachte Verunsicherung und die gefühlte Effizienzsteigerung abgefragt werden. Dies dient dazu, bei nicht eindeutigen Ergebnissen der Studie die Rahmenbedingungen der einzelnen ProbandInnen zu prüfen und nicht vorhergesehene Effekte anhand der Beantwortung des Fragebogens erklären zu können.

Durch dieses Studiendesign wird jede Aufgabe einmal mit und einmal ohne vorherige Schulung durchgeführt. Somit kann aus dem Vergleich der Ergebnisse der Einfluss der Schulung ermittelt werden, ohne dabei Rücksicht auf den Lerneffekt nehmen zu müssen, den ProbandInnen beim wiederholtem Bearbeiten derselben Aufgabe zeigen.

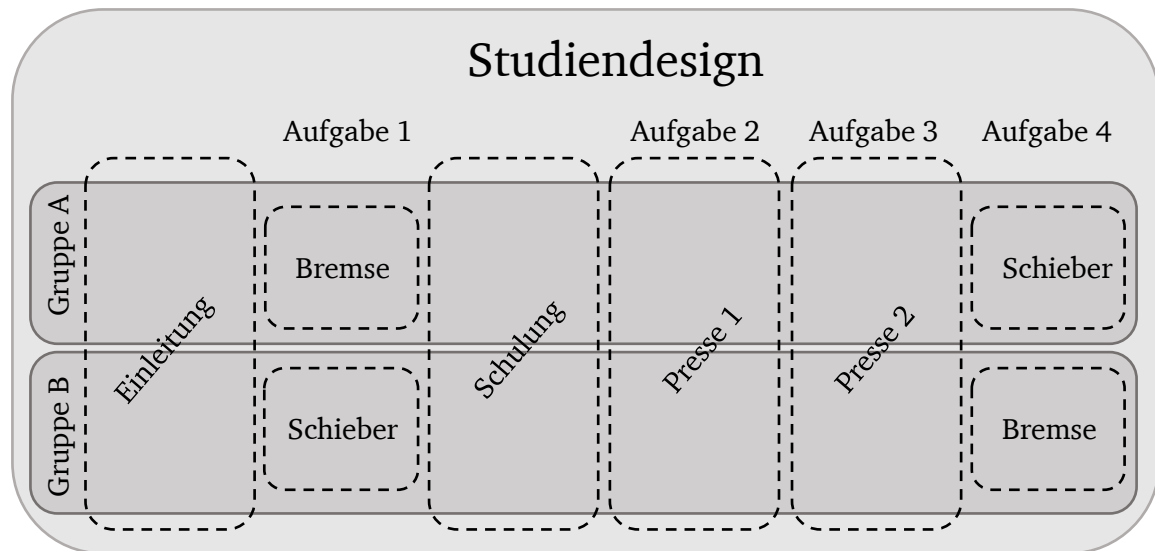


Abbildung 6.1: Aufbau der Crossover-Studie.

6.2 Studienaufgaben

Die Aufgaben werden in Form einer schriftlichen Prüfung gestellt, in der die ProbandInnen ihre Ergebnisse anhand eines Multiple-Choice Test eintragen müssen. Es gibt hierbei jeweils vier Ankreuzmöglichkeiten, die zu unterschiedlichen Bewertungen führen. Es gibt immer eine *richtige* Lösung, die von erfahrenen Konstrukteuren bevorzugt wurde und eine *falsche*, die zu keiner vernünftigen Messung führt. Zusätzlich gibt es noch zwei Antwortmöglichkeiten, die unterschiedlich gute Lösungen ergeben. Um noch genauer die einzelnen Fehler der ProbandInnen auswerten zu können, müssen sie nach der eigentlichen Aufgabe die möglichen Sensoren in die richtige Reihenfolge bringen.

In der Aufgabe *Bremse* müssen die ProbandInnen zwischen vier Ersatzgrößen für die axiale Bremskraft einer Industrie-Scheibenbremse wählen. Das Kriterium, an dem sich die ProbandInnen orientieren sollen, ist die Anzahl an Störgrößen, die berücksichtigt werden müssen. Hierfür wird ein etwas detaillierteres Modell der in Abschnitt 5.1 vorgestellten Bremse verwendet. Neben den in Abschnitt 5.1 diskutierten Lösungen wird den ProbandInnen eine Lösung, an der keine Dehnung gemessen werden kann und eine neuartige Lösung, die sich aktuell noch in der Patentanmeldung befindet, zur Auswahl gestellt. Die genaue Aufgabenstellung befindet sich im Anhang.

In der Aufgabe *Schieber* müssen die ProbandInnen zwischen verschiedenen Positionen für die Bestimmung der Zielgröße Kraft mithilfe der Dehnung als Ersatzgröße wählen. Als Kriterium dient hier die Stärke des Signals an der entsprechenden Position. Die Punkteverteilung der verschiedenen Antwortmöglichkeiten basiert auf den prognostizierten Dehnungen mithilfe einer FEM-Simulation. Auch hier befinden sich die genaue Aufgabenstellung und die Ergebnisse der Simulation im Anhang.

6.3 ProbandInnenauswahl

Im ersten Durchgang bestanden die ProbandInnen zu einem großen Teil aus Hilfwissenschaftlern (HiWis) des Fachgebiets Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) der Technischen Universität Darmstadt, die als TutorInnen die Lehre im Fach Maschinenelemente und Mechatronik II unterstützen. Diese StudentenInnen haben somit selbst das Fach Maschinenelemente und Mechatronik II, sowie das Product Design Project bestanden, in welchen die konstruktiven Grundlagen im Studiengang Maschinenbau (Bachelor of Science Mechanical and Process Engineering) vermittelt werden. Der zweite Durchgang der Studie wurde zusammen mit dem Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (IPEK) durchgeführt. Hierbei haben zum großen Teil wissenschaftliche MitarbeiterInnen (WiMis) des Instituts teilgenommen. Zusätzlich hat eine wissenschaftliche Mitarbeiterin des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) am zweiten Durchgang der Studie teilgenommen. Die Zusammensetzung der ProbandInnen in den Durchgängen ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Die Zusammenstellung ist anhand der erwarteten Erfahrung im Umgang mit den Analysemodellen der Produktentwicklung *Kraftfluss* und *C&C²-Modell* erfolgt. Es wird erwartet, dass die ProbandInnen, die aus dem Umfeld der TU Darmstadt stammen, mit dem Kraftfluss vertraut sind, während die ProbandInnen, die aus dem Umfeld des Karlsruher Instituts für Technologie kommen mit dem C&C²-Modell vertraut sind.

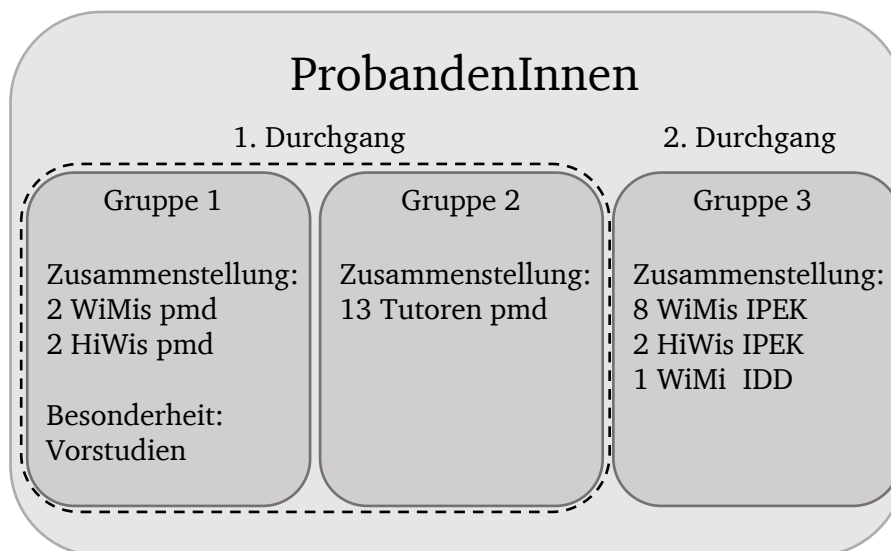


Abbildung 6.2: ProbandInnenzusammenstellung.

6.4 Auswertung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Durchgängen der Probandenstudie präsentiert. Die Auswertung lehnt sich an das in GRAUBERGER gewählte Vorgehen zur Auswertung an.²²⁵ Für die Auswertung abhängiger Stichproben, wie zum Beispiel der unterschiedlichen Bewertung der ProbandInnen wird der Wilcoxon-Rangsummen-Test²²⁶ verwendet. Für unabhängige Stichproben, wie zum Beispiel dem Vergleich der beiden Durchgänge oder der unterschiedlichen Probandengruppen, wird der Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Test²²⁷ genutzt.

6.4.1 Vergleich vor und nach Schulung

Abbildung 6.3 zeigt die Boxplots der statistischen Auswertung der Ergebnisse vor und nach der Schulung aller Durchgänge der Studie. Der Median der erreichten Punkte ist rot dargestellt. Die blaue Box kennzeichnet die Grenze für das untere und das obere Quartil. Es ist zu erkennen, dass nach der Schulung die ProbandInnen in der Bearbeitung der Aufgaben besser abschneiden als vor der Schulung.

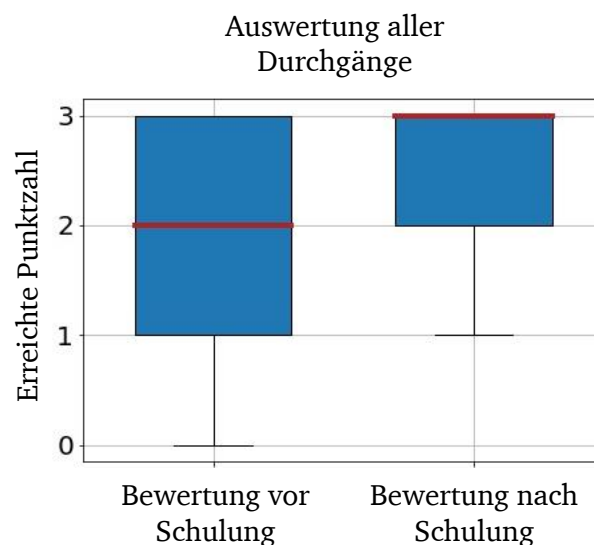


Abbildung 6.3: Vergleich der Bewertung vor und nach der Schulung aller Durchgänge.

Da für jede ProbandIn eine Bewertung vor und eine Bewertung nach der Schulung vorliegt und die Bewertung der einzelnen ProbandInnen aufgrund des Vorwissens nicht unabhängig sind, wird die Verbesserung für jeden ProbandInnen, aus der Bewertung nach und vor der Schulung ermittelt:

$$V_i = P_{\text{Nach},i} - P_{\text{Vor},i}$$

²²⁵ Vgl. Graubeger (2021) S. 52-54

²²⁶ Nach Wilcoxon (1945).

²²⁷ Nach Mann, Whitney (1947).

Die Häufigkeitsverteilung der Verbesserung ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Elf ProbandInnen erzielen vor und nach der Schulung die gleiche Punktzahl. Fünf ProbandInnen schneiden nach der Schulung schlechter ab als vor der Schulung. Zwölf ProbandInnen schließen nach der Schulung besser ab als vor der Schulung.

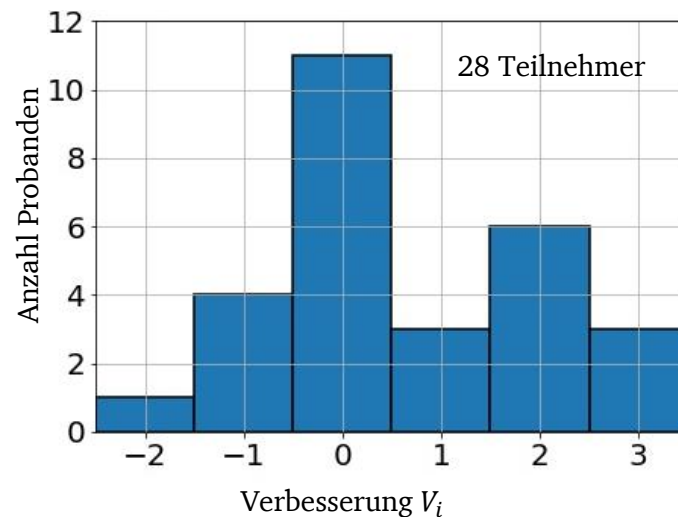


Abbildung 6.4: Häufigkeit der durch die Schulung erzielten Verbesserung.

Für den Wilcoxon-Rangsummen-Test für abhängige Stichproben werden die ProbandInnen, welche keine Verbesserung oder keine Verschlechterung erzielt haben, gleichwertig zur Gruppe der Verbesserungen und Verschlechterungen dazugezählt. So wird die Stichprobengröße erhalten und die Aussage über die Signifikanz ist dadurch etwas konservativer.²²⁸ Das Ergebnis des Wilcoxon-Rangsummen-Tests ist in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Ergebnis des Wilcoxon-Rangsummentests für die Signifikanz der durch die Schulung verursachten Veränderung.

Parametername	Zeichen	Wert
Stichprobengröße	N	28
Median vor Schulung	M_{Vor}	2
Median nach Schulung	M_{Nach}	3
T-Wert	T	115
p-Wert	p	0,0440
Effektstärke	r	0,33

Für einen p-Wert von $p = 0,0440$ beträgt der Restalpha-Fehler 5%, somit kann zu einer Signifikanz von 95% ein Effekt durch die Schulung nachgewiesen werden. Des Weiteren kann mithilfe des Abgleichs des T-Wertes mit dem kritischen T-Wert $T_{\text{Crit},28} = 116$ für eine Stichprobengröße von $N = 28$ verglichen und die Signifikanz von 95% bestätigt werden:

$$T = 115 < 116 = T_{\text{Crit},28}$$

Die Effektstärke von $r = 0,33$ nach COHEN führt zu einem mittleren Effekt.²²⁹

²²⁸ Siehe Pratt (1959) S. 663

²²⁹ Cohen (1992) S. 99

6.4.2 Vergleich der Durchgänge

Für den Vergleich der beiden Durchgänge wird die gleiche Auswertung wie in Abschnitt 6.4.1 verwendet. Die getrennte Auswertung der Durchgänge 1 und 2 ist in Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6 dargestellt.

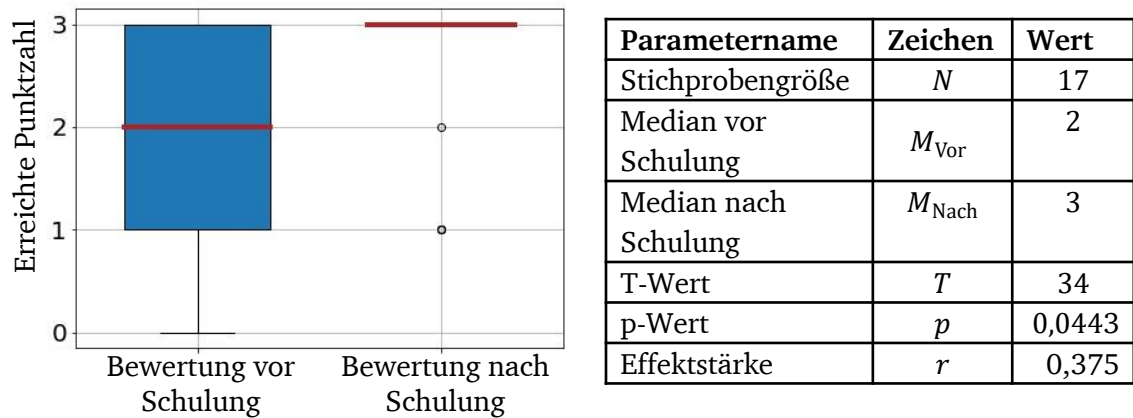


Abbildung 6.5: Auswertung 1. Durchgang.

Durchgang 1 der Studie zeigt einen signifikanten Einfluss der Schulung und einen etwas stärkeren Effekt von $r = 0,375$ als die gemeinsame Auswertung.

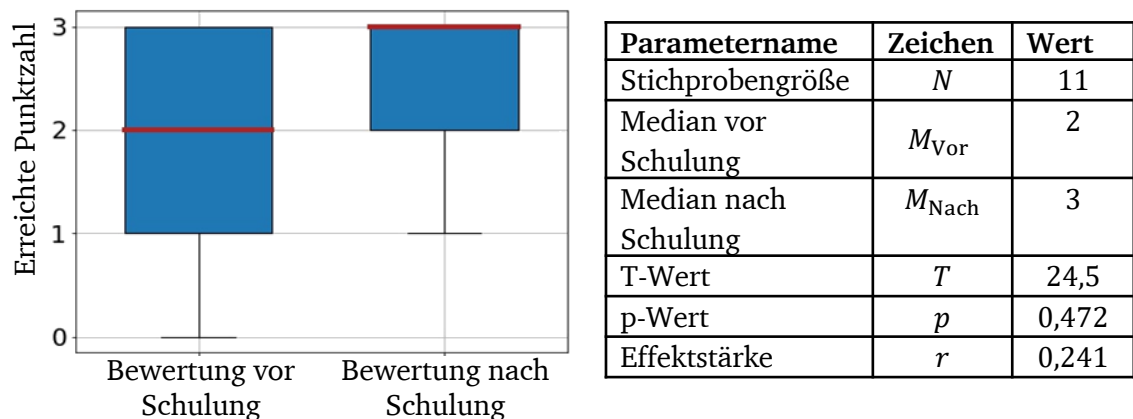


Abbildung 6.6: Auswertung 2. Durchgang.

Durchgang 2 der Studie zeigt keinen signifikanten Einfluss der Schulung. Zur Überprüfung, ob ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Durchgängen vorliegt, wird der Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Test der Verbesserung innerhalb des Durchgangs herangezogen. Das Ergebnis der Auswertung ist in Abbildung 6.7 gezeigt. Ein p-Wert von $p = 0,271$ liefert keine statistische Signifikanz für den Unterschied der beiden Durchgänge. Für die weiteren Auswertungen werden deshalb die Ergebnisse beider Durchgänge gemeinsam betrachtet.

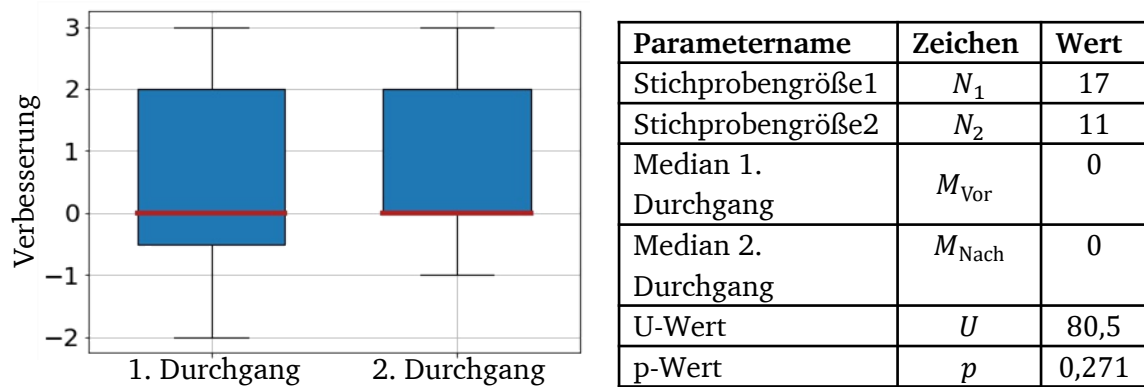


Abbildung 6.7: Auswertung des Vergleichs der beiden Durchgänge.

6.4.3 Vergleich der Aufgaben

Eine unterschiedliche Schwierigkeit der Aufgaben kann dazu führen, dass aufgrund der Reihenfolge, in der die beiden Aufgaben bearbeitet werden, ein Schulungseffekt fälschlich identifiziert wird, ohne dass dieser tatsächlich vorliegt. Daher werden die unterschiedlichen Bewertungen der beiden Aufgaben miteinander verglichen. Der Vergleich der beiden Aufgaben ist in Abbildung 6.8 gezeigt. Die Ergebnisse der Aufgabe *Bremse* sind mit einem p-Wert von $p = 0,0396$ mit einer Signifikanz von 95% schlechter bewertet worden als die Ergebnisse der Aufgabe *Schieber*. Der Effekt mit $r = 0,367$ zeigt eine mittlere Stärke.

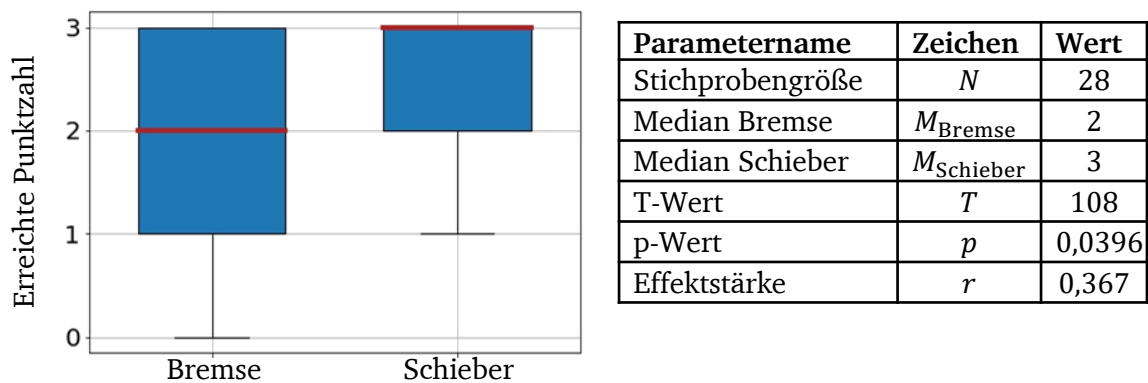


Abbildung 6.8: Auswertung des Vergleichs der Aufgaben.

6.4.4 Vergleich der Gruppen

Da die Aufteilung der ProbandInnen im jeweiligen Durchgang zufällig erfolgt, wird davon ausgegangen, dass die beiden Gruppen über beide Aufgaben gleich gut abschneiden. Um dies zu bestätigen, wird der Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben verwendet. Das Ergebnis des Tests ist in Abbildung 6.9 gezeigt. Ein p-Wert von $p = 0,0042$ liefert wider Erwarten einen Unterschied der beiden Gruppen mit 95% Signifikanz.

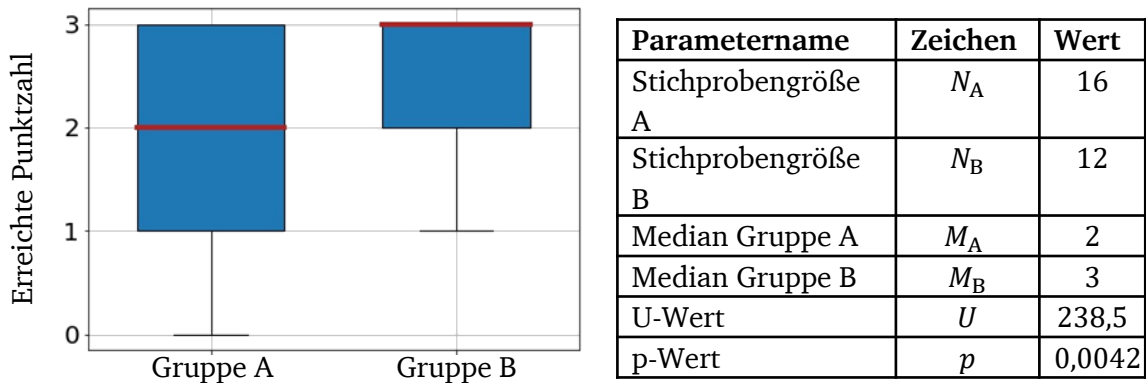


Abbildung 6.9: Auswertung des Vergleichs der beiden Gruppen.

6.4.5 Auswertung Kenntnisse der Modelle

Die Zusammensetzung der Durchgänge in Abschnitt 6.3 erfolgte aufgrund der erwarteten unterschiedlichen Kenntnis der beiden Analysemodelle Kraftfluss und C&C²-Modell. Zur Überprüfung dieser Erwartung erhielten die ProbandInnen zwischen der Bearbeitung der ersten Aufgabe und der Schulung einen Fragebogen, in dem sie ihre Kenntnis des jeweiligen Modells auf einer Skala von Null bis Zehn angeben sollten. Hierbei entspricht Null der Angabe „Noch nie davon gehört“, Fünf heißt „Einfache Aufgaben gelingen mir“ und Zehn steht für „Ich bin Experte“. Da es sich bei der Angabe der ProbandInnen um eine rein subjektive Aussage mithilfe der drei Vergleichspunkte handelt, wird hier auf eine statistische Auswertung verzichtet und lediglich die grafische Darstellung anhand von Boxplots herangezogen. Abbildung 6.10 zeigt die Ergebnisse der Auswertung des Fragebogens zur Kenntnis der beiden Modelle. Im ersten Durchgang ist das Modell des Kraftflusses bekannter als das C&C-Modell. Umgekehrt ist im zweiten Durchgang das C&C²-Modell bekannter als das Modell des Kraftflusses.

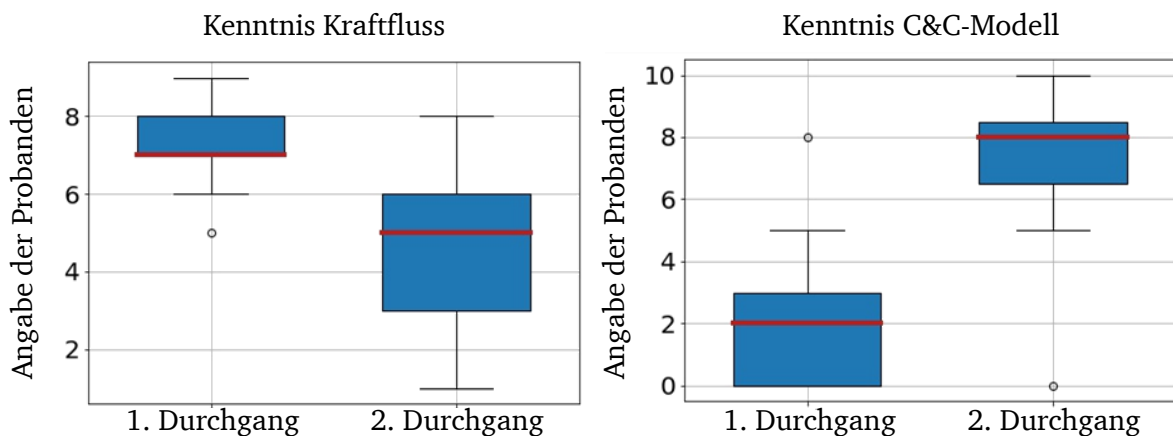


Abbildung 6.10: Vergleich der Kenntnisse der Analysemodelle. Links: Kraftfluss; Rechts: C&C-Modell.

Der Ausreißer im 2. Durchgang bei der Umfrage zur Kenntnis des C&C-Modells ist eine wissenschaftliche Mitarbeiterin des Instituts für Drucktechnik der TU Darmstadt. Diese Probandin hat aufgrund ihrer Ausbildung an der TU Darmstadt keine Kenntnis über das C&C-Modell. Diese Probandin wurde vom Studienleiter dem zweiten Durchgang zugeteilt, da der erste Durchgang bereits abgeschlossen war, als diese Probandin sich zur Probandenteilnahme entschlossen hatte.

6.5 Interpretation

Im Folgenden werden die in Abschnitt 6.4 präsentierten, rein statistischen Ergebnisse der Studie interpretiert, um Erkenntnisse über die Wirksamkeit und die Kenntnis des Lastpfad- und Knotenmodells zu erhalten.

6.5.1 Verbesserung durch Schulung

Die Auswertung der Studie zeigt einen signifikanten Unterschied in der Bewertung der Aufgaben, die vor und nach der Schulung bearbeitet wurden, vgl. Abbildung 6.3. Dies lässt auf einen signifikanten Einfluss der Schulung auf die Fähigkeit der Probandinnen bei der Einschätzung der Auswahl von Ersatzgrößen schließen. Dies zeigt, dass die Kenntnis über das Lastpfad- und Knotenmodell und des passenden Vorgehens zur Verbesserung der Auswahl von Ersatzgrößen beiträgt und zu einem besseren Verständnis der Zusammenhänge innerhalb von Systemen führt. Der Einfluss der Schulung, und somit der Vorteile des Lastpfad- und Knotenmodells, kann jedoch nicht als uneingeschränkt signifikant betrachtet werden. Da sich einerseits die Schwierigkeit der Aufgaben in der Studie unterscheiden und die verglichenen Probandengruppen eine ungleiche Stichprobengröße aufweisen, werden die Auswirkungen dieser zwei Aspekte auf die Aussagekraft der Studie im Folgenden detailliert analysiert. So soll eine reflektierte Aussage über die Verbesserung der Probandinnen durch die Kenntnis des Lastpfad- und Knotenmodells getroffen werden.

Aus den Ergebnissen aus Abschnitt 6.4.3 ist eine unterschiedliche Schwierigkeit der in der Studie bearbeiteten Aufgaben zu erkennen. Die Aufgabe Schieber ist leichter als die Aufgabe Bremse. Dies bedeutet für Gruppe A, dass sie zunächst die schwere Aufgabe bearbeiten und hierbei eine geringe Punktzahl erhalten. Nach der Schulung bearbeitet Gruppe A die leichte Aufgabe und erhält eine größere Punktzahl. Hierbei überlagert sich der positive Einfluss der Schulung mit dem Effekt der besseren Bewertung aufgrund einer leichteren Aufgabe. Der Effekt der Schulung wird somit überschätzt, vgl. Abbildung 6.11 links.

Der Vergleich mit Gruppe B zeigt, dass bei der Bearbeitung der leichten Aufgabe ohne Schulung eine große Punktzahl erreicht wird. Nach der Schulung wird die schwerere Aufgabe gleich gut bearbeitet. Hierbei überlagert sich der positive Einfluss der Schulung mit dem Effekt der schlechteren Bewertung aufgrund der schwereren Aufgabe. Der Effekt der Schulung wird im Gegensatz zu den Ergebnissen von Gruppe A unterschätzt. Weisen die beiden Gruppen die gleiche Stichprobenanzahl auf, kompensiert sich der Effekt der

unterschiedlich schweren Aufgaben. Da die Stichprobengröße N_A aber leicht größer als N_B ist, wird der Effekt der Schulung leicht überschätzt, vgl. Abbildung 6.11 rechts.

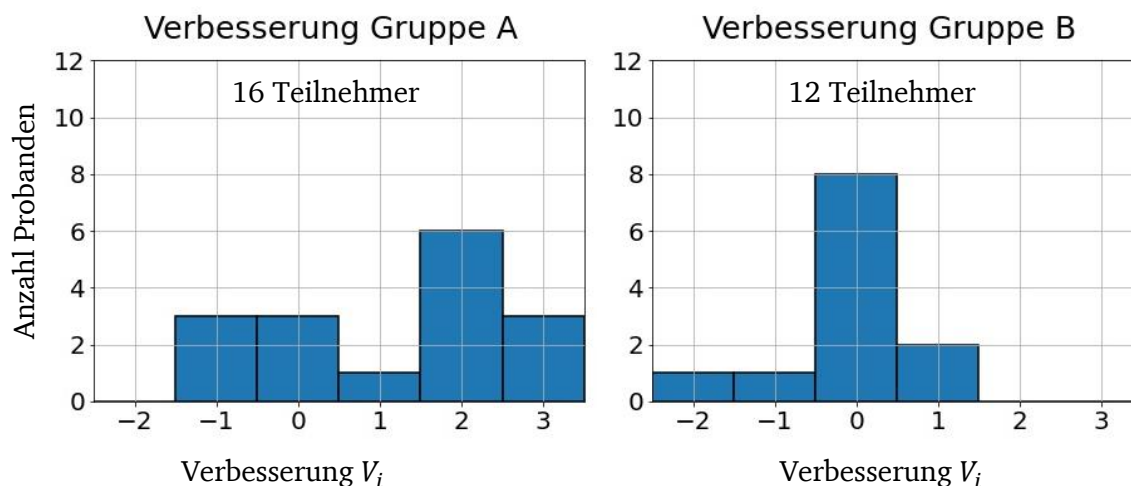


Abbildung 6.11: Verbesserung durch Schulung. Links: Gruppe A; Rechts Gruppe B.

Die beiden Gruppen wurden in den beiden Durchgängen jeweils zufällig zusammengestellt. Da die Teilnehmer des jeweiligen Durchgangs einer bestimmten Gruppe an Personen entnommen sind – hauptsächlich Tutoren desselben Faches und hauptsächlich Mitarbeiter desselben Lehrstuhls – sollten die beiden Gruppen eine vergleichbare Erfahrung und damit Fähigkeit in der Analyse mitbringen. Unter dieser Annahme kann die Bewertung der einzelnen Aufgaben herangezogen werden, um den Effekt der Schulung zu untersuchen.

Die Bewertung der Aufgabe *Schieber* lässt leider keine Differenzierung der beiden Gruppen zu und kein Schulungseffekt erkennen, da nahezu alle Probanden die volle Punktzahl erreichen, vgl. Abbildung 6.12 rechts.

Die Bewertung der Aufgabe *Bremse* zeigt jedoch eine bessere Bewertung der Gruppe B, die diese Aufgabe nach der Schulung bearbeitete. Der Mann-Whitney-U-Test liefert mit einer Signifikanz von 95% und einer Effektstärke von $r = 0,609$ nach COHEN²³⁰ einen deutlich stärkeren Schulungseffekt als die Betrachtung der Verbesserung über beide Aufgaben.

Abbildung 6.9 zeigt über beide Durchgänge hinweg einen signifikanten Unterschied in der Bewertung der beiden Gruppen zugunsten der Gruppe B, sodass auf den ersten Blick wider Erwarten nicht von gleich starken Gruppen ausgegangen werden kann. Dieser Effekt ergibt sich jedoch daraus, dass die Aufgabe *Schieber* so leicht gewählt ist, dass die ProbandInnen aus Gruppe B annähernd die volle Punktzahl auch ohne Schulung erzielen konnten. Das führt dazu, dass Gruppe A keine Möglichkeit hat, sich durch eine noch bessere Bewertung in der Bearbeitung der Aufgabe *Schieber* von der Bewertung der Gruppe B ohne Schulung abzuheben. Damit kann Gruppe A in der Gesamtpunktzahl nicht die fehlenden Punkte aus der schwereren Aufgabe aufholen und wird damit in der Gesamtpunktzahl

²³⁰ Cohen (1992) S. 99

fälschlicherweise schlechter bewertet als Gruppe B, sodass doch von zwei annähernd gleich starken Gruppen ausgegangen werden kann.

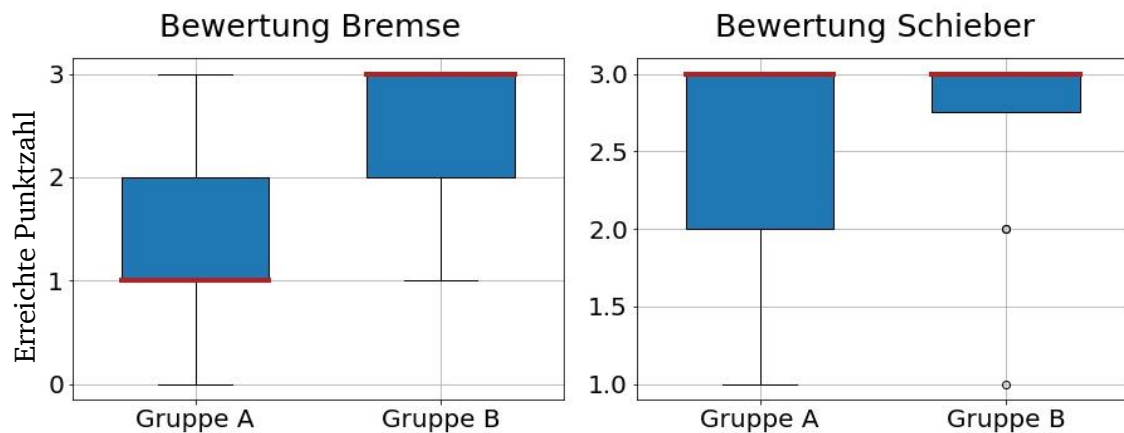


Abbildung 6.12: Vergleich der Gruppenbewertung bei unterschiedlichen Aufgaben. Links: Aufgabe *Bremse*; Rechts: Aufgabe *Schieber*.

Insgesamt kann trotz der unterschiedlichen Stichprobenanzahl ein Schulungseffekt interpretiert werden, da die Bewertung der schwereren der beiden Aufgaben einen signifikanten Unterschied aufweist und die beiden Gruppen A und B als gleich stark angenommen werden können.

Somit kann behauptet werden, dass die Schulung zum Lastpfad- und Knotenmodell das Systemverständnis der ProbandInnen gesteigert hat. Somit führt die Kenntnis über das Lastpfad- und Knotenmodell zu einer Verbesserung der Analysefähigkeit von EntwicklerInnen im Kontext der Sensorintegration und damit potenziell zu einer effizienteren Entwicklung von sensorintegrierten Produkten.

6.5.2 Unterschied der Signifikanz zwischen den Durchgängen

In Abbildung 6.6 wird deutlich, dass der Median der Bewertung nach der Schulung auch für den zweiten Durchgang größer ausfällt als vorher. Der Wilcoxon-Test liefert jedoch im Gegensatz zur gesamten Auswertung und der Auswertung des ersten Durchgangs keinen signifikanten Unterschied. Dies ist einerseits auf die geringere Stichprobengröße zurückzuführen, andererseits setzt sich der zweite Durchgang zum großen Teil aus wissenschaftlichen MitarbeiterInnen zusammen, die ihr technisches Studium bereits abgeschlossen haben und teilweise bereits mehr Erfahrung in der Konstruktion und der Analyse technischer Systeme aufweisen, als die ProbandInnen aus dem ersten Durchgang. Dies kann auch aus Abbildung 6.10 abgelesen werden. So geben die ProbandInnen aus dem ersten Durchgang an, kaum Erfahrung mit C&C²-Modellen zu haben. Die ProbandInnen aus dem zweiten Durchgang geben dagegen an, sowohl Erfahrung mit C&C²-Modellen als auch ein wenig Erfahrung mit dem Modell des Kraftflusses zu besitzen. Die Kenntnis mehrerer Modelle kann ebenfalls als Indikator für Erfahrung herangezogen werden. Auch die

Auswertung der Umfrage nach der Neuheit der vermittelten Inhalte zeigt, dass die vermittelten Inhalte für die ProbandInnen des zweiten Durchgangs eine geringere Neuheit aufweisen. Schulungen hinsichtlich Modellen und Methoden weisen bei erfahrenen Menschen einen geringeren Effekt auf, da diese mit ihrer Erfahrung ihre eigenen, teils impliziten Modelle und Methoden entwickelt haben, welche die Notwendigkeit der neuen Modelle und Methoden verringern.

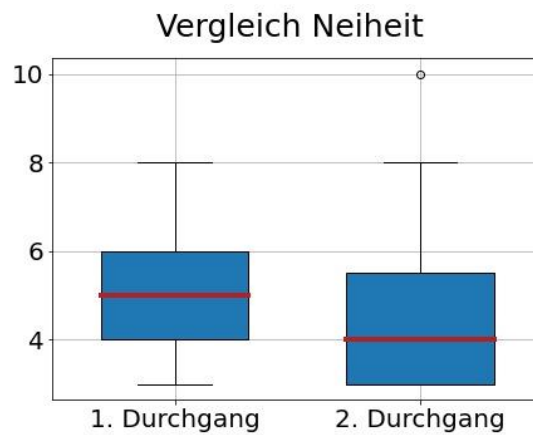


Abbildung 6.13: Vergleich der Neuheit der vermittelten Inhalte für die beiden Durchgänge.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat im Stand der Forschung in Kapitel 0 gezeigt, dass in der methodischen Produktentwicklung Modelle und Methoden erforscht werden, um den Zusammenhang zwischen Gestalt und Funktion zu ermitteln und zu beschreiben. Speziell für die Sensorintegration, bzw. die sensorische Weiterentwicklung technischer Systeme, gibt es keine ausreichenden Hilfsmittel. Im Bereich der Messtechnik spielen die Schwankungen aufgrund von Modellunsicherheit und Parameterunsicherheit eine große Rolle bei der Angabe der Messgenauigkeit. Für die Einschätzung von möglichen sensorischen Weiterentwicklungen sind die Unsicherheiten und der Aufwand, der betrieben werden muss, um diese Unsicherheiten zu beherrschen oder zu verringern, entscheidend. Bisher kann mittels C&C²-Modell, das zur Beschreibung des Zusammenhangs der Gestalt und der Funktion verwendet wird, keine Umformung und Wandlung des Signals beschrieben werden. Daher wird in Kapitel 0 dieser Forschungsbedarf aufgezeigt und die daraus resultierenden Forschungsfragen präsentiert.

In Kapitel 1 wird erst gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen Ziel- und Ersatzgröße von der jeweiligen Entwicklungsaufgabe und deren Rahmenbedingungen der Verfügbarkeit von Sensorik abhängt. Anschließend kann die Forschungsfrage 1 *Wie kann das C&C-Modell zur systematischen Suche von Ersatzgrößen verwendet werden?* beantwortet werden: Indem die Gestaltelemente, die für die Funktion *Energie leiten* benötigt werden, analysiert werden, können mögliche Ersatzgrößen systematisch identifiziert werden. Darauf aufbauend kann Forschungsfrage 2 *Wie können Störgrößen, die durch die Verwendung des bestehenden Systems als Sensor entstehen, erkannt werden?* wie folgt beantwortet werden: indem die funktionsrelevanten Parameter der Funktion *Signal leiten*, mithilfe des C&C²-Modells identifiziert und analysiert werden können. Auf Forschungsfrage 3 *Wie muss der C&C²-Ansatz erweitert werden, um auch sekundäre Reaktionen als Ersatzgrößen identifizieren zu können?* gibt es ebenfalls eine Antwort: Durch die Modellierung von *Umformen* und *Wandeln* der geleiteten Größen können sekundäre Reaktionen gefunden werden, deren Gestaltelemente die Möglichkeit für die Messung von Ersatzgrößen bieten. In Kapitel 0 wird die Forschungsfrage 4 *Wie kann das Lastpfad- und Knotenmodell für die Bewertung von Ersatzgrößen angewendet werden?* beantwortet: indem die Anzahl der *Knoten*, *Wandlungen* und *Umformungen* sowie die Kenntnis über die Unsicherheit der Parameter der mathematischen Modellierung der Elemente gegeneinander verglichen werden. Aufgrund der in Kapitel 1 präsentierten Einschränkungen in der Auswertung der Studie, kommt man bei Forschungsfrage 5 *Wie steigert die Kenntnis über das Lastpfad- und Knotenmodell die Analysefähigkeit?* nur bedingt zu einem Schluss: Die Analysefähigkeit der ProbandInnen scheint mit einer mittleren Effektstärke nach COHEN²³¹ zu steigen. Zusätzlich scheint eine größere Erfahrung und Vorbildung in der Konstruktion den Effekt der Kenntnis des Lastpfad- und

²³¹ Cohen (1992).

Knotenmodells zu schwächen. Für schwerere Aufgaben tritt der Schulungseffekt stärker als bei leichten Aufgaben auf.

8 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag, um die sensorische Weiterentwicklung technischer Systeme zu verbessern. Dies wird dadurch erreicht, dass durch die Erweiterung des C&C²-Ansatzes und mittels Lastpfad- und Knotenmodell Ersatzgrößen systematisch auf Ebene der Gestalt gesucht werden können. Somit können Ersatzgrößen des bestehenden Systems gefunden werden, die das Potential einer sensorischen Weiterentwicklung bieten, ohne Änderungen an der Primärfunktionsgestalt vornehmen zu müssen. Die Anwendbarkeit konnte an Beispielen gezeigt werden und die Verbesserung wurde anhand einer Probandenstudie gezeigt. Die Probandenstudie zeigt jedoch auch, dass die Auswahl der Schwierigkeit der Aufgaben sehr wichtig ist. Besonders bei unterschiedlichen Zusammensetzungen der Gruppen oder Gruppengrößen ist es wichtig, die Schwierigkeit der Aufgaben aufeinander zu abzustimmen. Daher bietet es sich an, die Studie in einem größeren Rahmen und mit zusätzlichen Aufgaben zu wiederholen.

Für die Reaktionen infolge der Wandlung und Umformung liegen jedoch noch keine konsistenten Regeln vor, die für eine automatisierte Auswertung notwendig sind. Stattdessen bedarf jede Wandlung und Umformung einer Einzelfallbeurteilung darüber, welche Reaktionsgrößen auftreten. Hier bedarf es weiterer Forschung, um eine einheitlichere Bildung des Lastpfad- und Knotenmodells zu erreichen. Eine Möglichkeit für die Bildung einer Gesetzmäßigkeit bieten Kataloge, in denen bekannte Reaktionen für die entsprechenden Wandlungen und Umformungen gesammelt werden können.

Mittels Analyse des Lastpfad- und Knotenmodells können die wichtigen Unsicherheitsquellen im Zusammenhang der Ziel- und der Ersatzgröße identifiziert werden. Dies liefert die Basis, um zwischen alternativen Ersatzgrößen und konstruktiven Maßnahmen entscheiden zu können. Hier wäre eine Anbindung an weitere Modelle, die zum Festlegen und Visualisieren von Toleranzen gedacht sind, hilfreich, um die Stärke des Einflusses von Toleranzen auf die Messkette der Ersatzgröße darstellen zu können.

Des Weiteren wird mithilfe des Lastpfad- und Knotenmodells die Suche nach Stellen und Komponenten, an denen interessante Ersatzgrößen gefunden werden, unterstützt. Die Auswahl der Ersatzgröße muss jedoch weiterhin intuitiv erfolgen. Eine regelbasierte Auswahl der Ersatzgröße anhand physikalischer Effektketten bietet die Möglichkeit, die Auswahl von Ersatzgrößen zu automatisieren.²³²

²³² Dissertation Vorwerk-Handing (Noch nicht veröffentlicht).

Anhang A – Probandenstudie

A1 – Aufgabenstellung

Schieber

Beschreibung:

Es wird ein Schieber für die Zufuhr von Rohlingen in den Wälzspalt einer Walzprofiliermaschine betrachtet.

Das Schwert wird mithilfe der Zentrierkontur am Schwerthalter zentriert und anschließend mit der Befestigungsschraube auf den Schwerthalter geschraubt. (Die Schraube wird dabei vorgespannt)

An der Spitze des Schwerts befindet sich der Rohling, der in den Wälzspalt geschoben wird. Die Reibung und das Gewicht des Rohlings verursachen eine Kraft auf das Schwert. Auf der vom Schwert abgewandten Seite des Schwerthalters befindet sich ein Linearantrieb (Nicht dargestellt), der den Schwerthalter und damit auch das Schwert entlang der x-Achse bewegt.

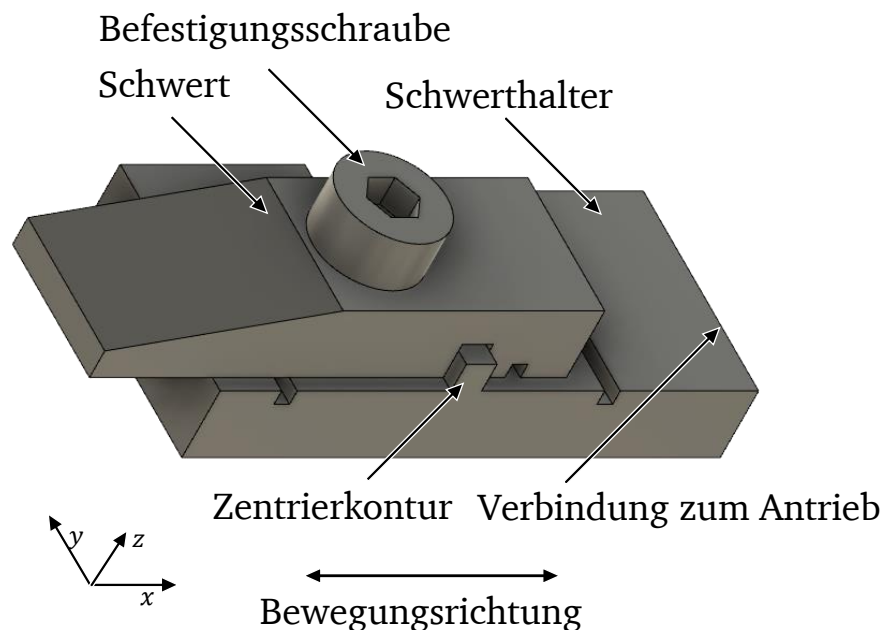


Abbildung 8.1: Beschreibung Schieber.

Aufgabe:

Zur Überprüfung ob ein Rohling und auch der richtige Rohling in den Wälzspalt gefördert wurde soll die Kraft, die auf die Spitze des Schwertes wirkt gemessen werden. Hierfür stehen die 4 gezeigten Sensoren zur Verfügung:

Die Sensitivitäten der einzelnen Sensoren sind alle gleich.

Wählen Sie den Sensor aus, der das stärkste Signal (Dehnung) infolge der Kraft auf die Spitze des Schwertes erfährt.

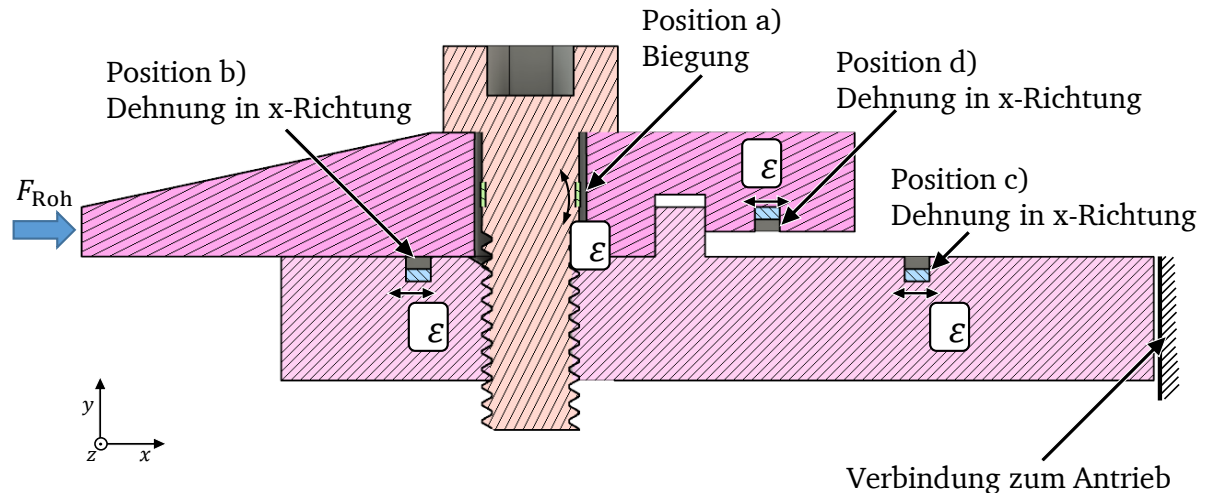


Abbildung 8.2: Zur Auswahl stehende Sensoren.

Bewertung:

Position a): 1 Punkt

Position b): 2 Punkte

Position c): 3 Punkte

Position d): 0 Punkte

Bremse

Beschreibung:

Es wird eine hydraulisch betätigte Scheibenbremse betrachtet. Die Tellerfedern werden bei der Montage vorgespannt, sodass die Bremse im drucklosen Zustand geschlossen ist. Aufgrund der Reibung und der axialen Bremskraft entsteht eine Querkraft, die als Bremsmoment auf die Bremsscheibe wirkt

Der Bremskolben ist im Gehäuse geführt. Dazwischen befindet sich eine Dichtung.

Der Federhalter ist im Hydraulikgehäuse geführt und bildet den beweglichen Teil des Hydraulikkolbens. Auch hier sind beide Führungen abgedichtet.

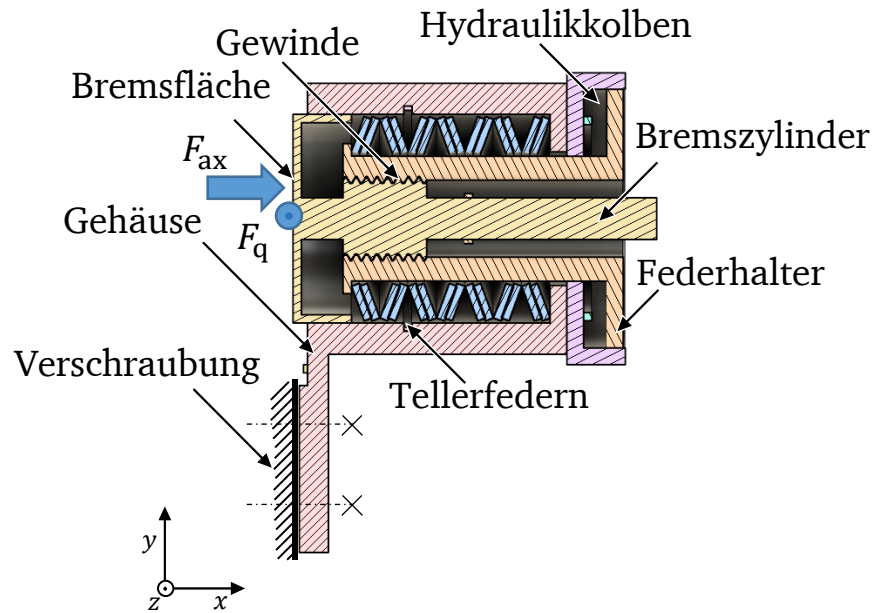


Abbildung 8.3: Beschreibung Bremse.

Aufgabe:

Für die Regelung der Bremse soll die axiale Bremskraft erfasst werden. Hierfür stehen die 4 eingetragenen Sensoren zur Verfügung:

Die Sensoren weisen die gleiche Sensitivität auf, es müssen jedoch je nach Messort unterschiedliche Störgrößen berücksichtigt werden.

Wählen Sie den Sensor aus, bei dem am wenigsten Störgrößen berücksichtigt werden müssen.

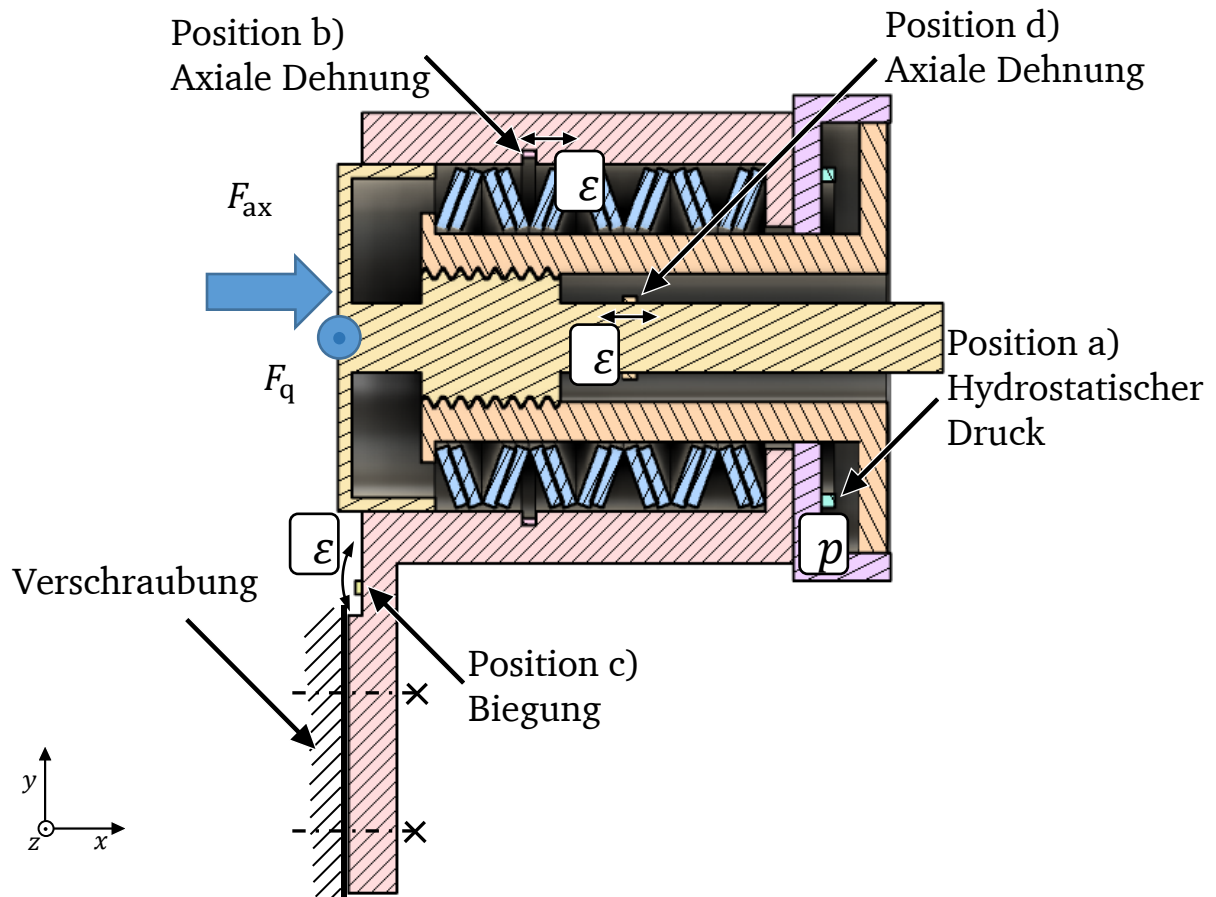


Abbildung 8.4: Zur Auswahl stehende Sensoren.

Bewertung

- Position a): 1 Punkt
- Position b): 2 Punkte
- Position c): 3 Punkte
- Position d): 0 Punkte

A2 – Fragebögen

Der Fragebogen wurde während der Bearbeitung in Moodle in mithilfe der folgenden Masken ausgefüllt:

Geben Sie auf einer Skala von 0-10 an, wie vertraut ihnen das Modell des Kraftflusses ist.

0: Noch nie davon gehört

5: Einfache Aufgaben gelingen mir

10: Ich bin Experte

Antwort:

Geben Sie auf einer Skala von 0-10 an, wie vertraut ihnen das Contact und Channel Modell ist? (Weitere Synonyme für das Modell: C&CM; C&CA; C&C²M; C&C²A)

0: Noch nie davon gehört

5: Einfache Aufgaben gelingen mir

10: Ich bin Experte

Antwort:

Bitte bewerten Sie die Schwierigkeit von Aufgabe 1 auf einer Skala von 0-10

0: Ich musste nicht nachdenken

5: In der vorgegebenen Zeit gut machbar

10: Ich habe die Aufgabe nicht lösen können

Antwort:

Bitte bewerten Sie die Schwierigkeit von Aufgabe 2 auf einer Skala von 0-10

0: Ich musste nicht nachdenken

5: In der vorgegebenen Zeit gut machbar

10: Ich habe die Aufgabe nicht lösen können

Antwort:

Bitte geben Sie an wie sehr Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

0: Ich stimme nicht zu

5: Ich stimme weder zu noch widerspreche ich

10: Ich stimme voll zu

Die vermittelten Inhalte waren für mich komplett neu.

Antwort:

Bitte geben Sie an wie sehr Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

0: Ich stimme nicht zu

5: Ich stimme weder zu noch widerspreche ich

10: Ich stimme voll zu

Die Schulung hat mich verunsichert.

Antwort:

Bitte geben Sie an wie sehr Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

0: Ich stimme nicht zu

5: Ich stimme weder zu noch widerspreche ich

10: Ich stimme voll zu

Die Schulung hat mein Vorgehen effizienter gemacht.

Antwort:

A3 – Ergebnisse der Probandenstudien

1. Teil: Ergebnisse der Bearbeitung

Information über ProbandIn				Bearbeitungszeiten gerundet in Minuten				Bewertungen der Aufgaben [0 bis 3 Punkte]				
ID	Fachsemester	Hauptgruppe	Probanden- gruppe	Vor Schulung	Nach Schulung	Bremse	Schieber	Vor Schulung	Nach Schulung	Bremse	Schieber	Verbesserung V_t (berechnet)
0	-	Vorstudie	A	-	-	-	-	0	3	0	3	3
1	10	Vorstudie	B	-	-	-	-	3	3	3	3	0
2	-	Vorstudie	A	-	-	-	-	1	3	1	3	2
3	-	Vorstudie	B	-	-	-	-	3	3	3	3	0
4	8	Tutor	A	7	10	7	10	1	3	1	3	2
5	8	Tutor	A	11	7	11	7	1	1	1	1	0
6	9	Tutor	A	17	14	17	14	2	1	2	1	-1
7	12	Tutor	A	9	11	9	11	1	3	1	3	2
8	6	Tutor	A	16	10	16	10	0	3	0	3	3
9	10	Tutor	A	17	14	17	14	2	1	2	1	-1
10	7	Tutor	A	17	10	17	10	2	3	2	3	1
11	8	Tutor	A	8	9	8	9	3	3	3	3	0
12	6	Tutor	B	6	5	5	6	3	3	3	3	0
13	8	Tutor	B	8	9	9	8	3	3	3	3	0
14	8	Tutor	B	8	4	4	8	3	3	3	3	0
15	8	Tutor	B	8	7	7	8	1	2	2	1	1
16	9	Tutor	B	10	6	6	10	2	3	3	2	1
17	8	WiMi	A	18	7	18	7	1	3	1	3	2
18	12	HiWi	A	17	7	17	7	1	3	1	3	2
19	6	WiMi	A	16	14	16	14	0	3	0	3	3
20	8	WiMi	A	16	12	16	12	3	2	3	2	-1
21	10	WiMi	A	16	6	16	6	1	3	1	3	2
22	2	Industrie	A	12	10	12	10	2	2	2	2	0

Information über ProbandIn				Bearbeitungszeiten gerundet in Minuten				Bewertungen der Aufgaben [0 bis 3 Punkte]				
ID	Fachsemester	Hauptgruppe	Probanden- gruppe	Vor Schulung	Nach Schulung	Bremse	Schieber	Vor Schulung	Nach Schulung	Bremse	Schieber	Verbesserung V_t (berechnet)
23	2	WiMi (Mechatronik und Infomatik- onstechnik)	B	9	9	9	9	3	2	2	3	-1
24	2	WiMi	B	9	11	11	9	3	3	3	3	0
25	8	WiMi	B	6	6	6	6	3	3	3	3	0
26	10	HiWi (Mechatronik und Informations- technik)	B	8	8	8	8	2	2	2	2	0
27	10	WiMi	B	5	7	7	5	3	1	1	3	-2

2. Teil: Ergebnisse aus den Fragebögen

Information über ProbandIn				Ergebnisse aus Fragebögen								
ID	Fachsemester	Hauptgruppe	Probanden- gruppe	Kenntnis Kraftfluss	Kenntnis C&C	Schwere vor Schulung	Schwere nach Schulung	Schwere Bremse	Schwere Schieber	Neuheit	Verun- sicherung	Effizienz- steigerung
0	-	Vorstudie	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	10	Vorstudie	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	Vorstudie	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	Vorstudie	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	8	Tutor	A	8	0	5	6	5	6	6	2	5
5	8	Tutor	A	9	3	4	5	4	5	3	0	8
6	9	Tutor	A	7	2	8	8	8	8	8	2	2
7	12	Tutor	A	8	1	3	6	3	6	4	0	7
8	6	Tutor	A	7	0	5	8	5	8	5	0	10
9	10	Tutor	A	6	3	7	8	7	8	8	6	3
10	7	Tutor	A	7	1	5	7	5	7	6	0	10
11	8	Tutor	A	8	0	4	3	4	3	6	1	8
12	6	Tutor	B	8	5	5	6	6	5	5	0	6

Literaturverzeichnis

Albers et al. (2008)

Albers, A.; Alink, T.; Matthiesen, S.; Thau, S.: Support of System Analyses and Improvement in Industrial Design Through Contact & Channel Model. In: Marjanović, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojčetić, N. (Hrsg.): DS 38: Proceedings DESIGN 2008, the 10th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia. 2008.

Albers et al. (2017)

Albers, A.; Bursac, N.; Rapp, S.: PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. In: Forschung im Ingenieurwesen, 81 (1). 2017, S. 13-31. <https://doi.org/10.1007/s10010-016-0210-0>.

Anderl, R. Picard, André et al. (2015)

Anderl, R. Picard, André; Wang, Y.; Fleischer, J.; Dosch, S.; Klee, B.; Bauer, J.: Leitfaden Industrie 4.0. Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. Frankfurt am Main: VDMA-Verl. 2015.

Ballas et al. (2009)

Ballas, R. G.; Pfeifer, G.; Werthschützky, R.: Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik. Dynamischer Entwurf, Grundlagen und Anwendungen. 2. Aufl. Berlin: Springer 2009. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-89320-2>.

Bauernhansl (2017)

Bauernhansl, T.: Digitalisierung im Mittelstand. Entscheidungsgrundlagen und Handlungsempfehlungen. Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA 2017.

Beetz (2018)

Beetz, J.-P.: Modelle und Methoden zur systematischen Entwicklung hygienegerechter Produkte. 2018. Technische Universität Darmstadt. Dissertation.

Birkhofer (1980)

Birkhofer, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Nr. 70. Düsseldorf: VDI-Verl. 1980.

Brecher et al. (2016)

Brecher, C.; Jasper, D.; Schmidt, M. F.: Methodik zur Ermittlung der Schraubenzusatzkräfte von Schraubenverbindungen. In: Konstruktion, 2016 (6). 2016, S. 78-82.

Brinkmann (2012)

Brinkmann, B.: Internationales Wörterbuch der Metrologie. Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) Deutsch-Englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007. 4. Aufl. Beuth Wissen. s.l.: Beuth Verlag GmbH 2012.

Busch (2015)

Busch, R.: Elektrotechnik und Elektronik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-09675-5>.

Cohen (1992)

Cohen, J.: Statistical Power Analysis. In: Current Directions in Psychological Science, 1 (3). 1992, S. 98-101. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.ep10768783>.

Deckers (2014)

Deckers, J.: Dem Defekt einen Schritt voraus. In: Schwingungsüberwachung. VDI-Fachtagung ; Leonberg bei Stuttgart, 20. und 21. Mai 2014. Nichtred. Ms.-Dr. Düsseldorf: VDI-Verl. 2014.

DIN 1319-1 (1995)

DIN 1319-1: Grundlagen der Meßtechnik. Ausg. 1995. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). 1995.

Dörr et al. (2019)

Dörr, M.; Ries, M.; Gwosch, T.; Matthiesen, S.: Recognizing Product Application based on Integrated Consumer Grade Sensors: A Case Study with Handheld Power Tools. In: Procedia CIRP, 84. 2019, S. 798-803.

Dorst, Cross (2001)

Dorst, K.; Cross, N.: Creativity in the design process: co-evolution of problem–solution. In: Design Studies, 22 (5). 2001, S. 425-437. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(01\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(01)00009-6).

Eckert et al. (2010)

Eckert, C.; Alink, T.; Albers, A.: Issue Driven Analysis of an Existing Product at Different Levels of Abstraction. In: Marjanović, D. (Hrsg.): Design 2010. 11th International Design Conference, Dubrovnik - Croatia, May 17 - 20, 2010. Zagreb: 2010.

Ehrlenspiel (2009)

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4., aktualisierte Aufl. München: Hanser 2009.

Ehrlenspiel, Meerkamm (2013)

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2013. <https://doi.org/10.3139/9783446436275>.

Eifler (2014)

Eifler, T.: Modellgestützte Methodik zur systematischen Analyse von Unsicherheit im Lebenslauf technischer Systeme. 2014. Technische Universität Darmstadt. Dissertation.

Feldhusen, Grote (2013)

Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin - Heidelberg: Springer Vieweg 2013.

Fleischer et al. (2018)

Fleischer, J.; Klee, B.; Spohrer, A.; Merz, S.: Leitfaden Sensorik für Industrie 4.0. VDMA. 2018.

Freund (2018)

Freund, T.: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in technischen Systemen. 2018. Technische Universität Darmstadt. Dissertation. http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/7231/1/Diss_Freund.pdf, zuletzt geprüft am 28.03.2018.

Furtmann (2017)

Furtmann, A.: Elektrisches Verhalten von Maschinenelementen im Antriebsstrang. 2017. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Dissertation.

Giordani, Mari (2019)

Giordani, A.; Mari, L.: A structural model of direct measurement. In: Measurement, 145. 2019, S. 535-550. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.060>.

Gramlich (2013)

Gramlich, S.: Vom fertigungsgerechten Konstruieren zum produktionsintegrierenden Entwickeln. Durchgängige Modelle und Methoden im Produktlebenszyklus. Als Ms. gedr. Berichte aus dem Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt, Nr. 423. Düsseldorf: VDI-Verl. 2013.

Grauberger (2021)

Grauberger, P.: Eine methodische Unterstützung der Modellbildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen in der Gestaltung. 2021. Karlsruher Institut für Technologie. Dissertation. (Arbeitsstand vom 25.06.2020).

Groche, Brenneis (2014)

Groche, P.; Brenneis, M.: Manufacturing and use of novel sensoric fasteners for monitoring forming processes. In: Measurement, 53. 2014, S. 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.03.042>.

Großkurth, Martin (2019)

Großkurth, D.; Martin, G.: Intelligenter Zahnriemen. In: AMA Association for Sensors and Measurement, Sophie-Charlotten-Str. 15, 9 Berlin; Informationstechnische Gesellschaft im VDE, Frankfurt; VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, Düsseldorf (Hrsg.): 20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019. Tagungsband. Wunstorf, Germany: AMA Service GmbH 2019.

Gwosch (2019)

Gwosch, T.: Antriebsstrangprüfstände zur Ableitung von Konstruktionszielgrößen in der Produktentwicklung handgehaltener Power-Tools. 2019. Karlsruher Institut für Technologie. Dissertation. <https://doi.org/10.5445/IR/1000096256>.

Harder, Kirchner (2019)

Harder, A.; Kirchner, E.: Untersuchung der sensorischen Eigenschaften von Gleitlagern. In: Schlecht, B. (Hrsg.): Dresdner Maschinenelemente Kolloquium DMK 2019. Dresden: Sierke Verlag 2019, S. 533-542.

Heidemann (2001)

Heidemann, B.: Trennende Verknüpfung. Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen. Als Ms. gedr. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, Nr. 351. Düsseldorf: VDI-Verl. 2001.

Heidenblut et al. (2007)

Heidenblut, S.; Kessel, R.; Sommer, K.-D.; Weckenmann, A.: Ein Modellbildungskonzept für die praxisgerechte Bestimmung der Messunsicherheit (A Modelling Concept for Practice-Oriented Evaluation of Measurement Uncertainty). In: *tm - Technisches Messen*, 74 (10). 2007, S. 221.

<https://doi.org/10.1524/teme.2007.74.10.494>.

Hubka (1984)

Hubka, V.: *Theorie Technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*. Zweite, völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Hochschultext. Berlin, Heidelberg - s.l.: Springer Berlin Heidelberg 1984. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10446-0>.

JCGM 100 (2008)

JCGM 100: Evaluation of measurement data. Ausg. 2008. Joint Committee for Guides in Metrology (Hrsg.). 2008.

Kirchner (2020)

Kirchner, E.: *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61762-5>.

Klauer (2018)

Klauer, V. V.: *Ermittlung der Kraftaufteilung verspannter Welle-Nabe-Verbindung mittels FEM*. 2018. Technische Universität Darmstadt. Bachelor-Thesis.

Kong et al. (2018)

Kong, Q.; Zhu, J.; Ho, S. C. M.; Song, G.: Tapping and listening. A new approach to bolt looseness monitoring. In: *Smart Materials and Structures*, 27 (7). 2018, S. 07LT02.

Lindemann (2009)

Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3., korrigierte Aufl. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01423-9>.

Lunze (2014)

Lunze, J.: *Regelungstechnik 1. Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 10., aktualisierte Aufl. 2014. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014.

Mann, Whitney (1947)

Mann, H. B.; Whitney, D. R.: On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. In: *The Annals of Mathematical Statistics*, 18 (1). 1947, S. 50-60.

<https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>.

Martin et al. (2018a)

Martin, G.; Vogel, S.; Schirra, T.; Vorwerk-Handing, G.; Kirchner, E.: Methodical Evaluation of Sensor Positions for Condition Monitoring of Gears. In: Ekströmer, P.; Schütte, S.; Ölvander, J. (Hrsg.): *Proceedings of NordDesign 2018, Linköping, Sweden, 14th - 17th August 2018*. 2018.

Martin et al. (2018b)

Martin, G.; Schork, S.; Vogel, S.; Kirchner, E.: MME. Potentiale mikroinvasiver intelligenter Maschinenelemente. In: Konstruktion, 2018 (01-02). 2018, S. 71-82.

Matthias (2015)

Matthias, J.: Auf dem Weg zu robusten Lösungen. Modelle und Methoden zur Beherrschung von Unsicherheit in den Frühen Phasen der Produktentwicklung. 2015. Technische Universität Darmstadt. Dissertation.

Matthiesen (2002)

Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Element-modells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. 2002. Universität Karlsruhe. Dissertation.

Matthiesen, Ruckpaul (2012)

Matthiesen, S.; Ruckpaul, A.: New insights on the contact&channel-approach - Modelling of systems with several logical states. In: Marjanović, D. (Hrsg.): DESIGN 2012: Proceedings of the 12th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia, May 21-24, 2012. Glasgow: The Design Society 2012, S. 1019-1028.

Matthiesen et al. (2014)

Matthiesen, S.; Gwosch, T.; Mangold, S.: Eine Methode für eine Prüf- und Validierungsumgebung zur Komponentenuntersuchung handgehaltener Geräte in der Produktentwicklung. In: Brökel, K.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Rieg, F.; Stelzer, R. (Hrsg.): Methoden in der Produktentwicklung. Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess ; Tagungsband ; 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014 am 16. und 17.10.2009 in Bayreuth. Bayreuth: 2014.

Matthiesen et al. (2018a)

Matthiesen, S.; Wettstein, A.; Grauberger, P.: Analysis of dynamic system behaviour using sequence modelling with the C&C2-Approach - a case study on a power tool hammer mechanism. In: Ekströmer, P.; Schütte, S.; Ölvander, J. (Hrsg.): Proceedings of NordDesign 2018, Linköping, Sweden, 14th - 17th August 2018. 2018.

Matthiesen et al. (2018b)

Matthiesen, S.; Grauberger, P.; Hölz, K.; Nelius, T.; Bremer, F.; Wettstein, A.; Gessinger, A.; Pflegler, B.; Nowoseltschenko, K.; Voß, K.: Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse und Synthese 2018. <https://doi.org/10.5445/IR/1000080744>.

Matthiesen et al. (2019a)

Matthiesen, S.; Grauberger, P.; Schrempp, L.: Extended Sequence Modelling in Design Engineering – Gaining and Documenting Knowledge about Embodiment Function Relations with the C&C 2 -Approach. In: Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design, 1 (1). 2019, S. 1483-1492. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.154>.

Matthiesen et al. (2019b)

Matthiesen, S.; Grauberger, P.; Bremer, F.; Nowoseltschenko, K.: Product Models in Embodiment Design – an Investigation of Challenges and Possibilities. In: Springer Nature Applied Sciences (1078). 2019. <https://doi.org/10.5445/IR/1000089686>.

Matthiesen (2020)

Matthiesen, S.: Prozess und Methoden der Gestaltung. In: Bender, B.; Gericke, K. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre (9. Aufl.). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH 2020.

Meboldt (2008)

Meboldt, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung - als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). Mental and formal modelling, a contribution to the integrated product development model (iPeM). 2008. Universität Karlsruhe. Dissertation.

Oppel (2008)

Oppel, F.: Backenprofilwalze. DE102005013746B4: 2008.

Pahl et al. (2007)

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer 2007.

Pratt (1959)

Pratt, J. W.: Remarks on Zeros and Ties in the Wilcoxon Signed Rank Procedures. In: Journal of the American Statistical Association, 54 (287). 1959, S. 655-667. <https://doi.org/10.1080/01621459.1959.10501526>.

Richter et al. (2010)

Richter, W.; Dietrich, G.; Fritzen, C.-P.; Faust, D.: Anordnung zur Bremskraftmessung. WO 2010/000468A1: 2010.

Roos (2018)

Roos, M.: Ein Beitrag zur einheitlichen Modellierung und durchgängigen Nutzung fertigungstechnologischen Wissens im Produktentwicklungsprozess. Als Manuskript gedruckt. Berichte aus dem Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt, Nr. Nr. 441. 2018.

Ropohl (1975)

Ropohl, G.: Systemtechnik. Grundlagen und Anwendung ; mit 5 Tabellen. München: Hanser 1975.

Ropohl (2009)

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. KIT Scientific Publishing 2009. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000011529>.

Rossi et al. (2019)

Rossi, G. B.; Crenna, F.; Palazzo, A.: A Proposal for a More User-Oriented GUM. In: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 68 (5). 2019, S. 1343-1352. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2899183>.

Roth (2000)

Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2000.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-17466-7>.

Rude (1998)

Rude, S.: Wissensbasiertes Konstruieren. Als Ms. gedr. Berichte aus dem Maschinenbau. Aachen: Shaker 1998.

Sauer (2006)

Sauer, T.: Ein Konzept zur Nutzung von Lösungsobjekten für die Produktentwicklung in Lern- und Anwendungssystemen. Berichte aus dem Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt, Nr. 390. Düsseldorf: VDI-Verl. 2006.

Sauer (2016)

Sauer, B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1. Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. 9. Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin - Heidelberg: Springer Vieweg 2016.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-39501-7>.

Schirra et al. (2018)

Schirra, T.; Martin, G.; Vogel, S.; Kirchner, E.: Ball Bearings as Sensors for Systematical Combination of Load and Failure Monitoring. In: Design 18. 15th International Design Conference. 2018, S. 3011-3022.
<https://doi.org/10.21278/idc.2018.0306>.

Schork et al. (2016)

Schork, S.; Gramlich, S.; Kirchner, E.: Entwicklung von Smart ME. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X - Beiträge zum 27. DfX-Symposium Oktober 2016, Jesteburg, Germany. Hamburg: Tu-Tech Verlag TuTech Innovation GmbH 2016, S. 181-192.

Sommer, Siebert (2004)

Sommer, K.-D.; Siebert, B. R. L.: Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM (Practical Determination of the Measurement Uncertainty under GUM). In: tm - Technisches Messen, 71 (2-2004). 2004, S. 52-66. <https://doi.org/10.1524/teme.71.2.52.27068>.

Sommer (2009)

Sommer, K.-D.: Modelling of Measurements, System Theory and Uncertainty Evaluation. In: Pavese, F.; Forbes, A. B. (Hrsg.): Data Modeling for Metrology and Testing in Measurement Science. Boston: Birkhäuser Boston 2009, S. 1-23. https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4804-6_9.

Sommer, Kessel (2014)

Sommer, K.-D.; Kessel, R.: Messunsicherheit. In: Tränkler, H.-R.; Reindl, L. M. (Hrsg.): Sensortechnik. Handbuch für Praxis und Wissenschaft. 2., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2014, S. 21-53.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-29942-1_2.

Stachowiak (1973)

Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer 1973.

Stücheli, Meboldt (2013)

Stücheli, M.; Meboldt, M.: Mechatronic Machine Elements. In: Abramovici, M.; Stark, R. (Hrsg.): Smart Product Engineering. Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference, Bochum, Germany, March 11th - 13th, 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013, S. 263-272. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8_26.

Thau (2013)

Thau, S. L.: Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld. 2013. Karlsruher Institut für Technologie. Dissertation.

Thusty, Andrews (1983)

Thusty, J.; Andrews, G. C.: A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining. In: CIRP Annals, 32 (2). 1983, S. 563-572. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60184-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60184-X).

VDI 2221 (1993)

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Ausg. Mai 1993. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). 1993.

VDI 2222 (1997)

VDI 2222: Konstruktionsmethodik Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Ausg. Juni 1997. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). 1997.

VDI 2223 (2004)

VDI 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Ausg. Januar 2004. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). 2004.

VDI 2221 - 2 (2018)

VDI 2221 - 2: Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse. Ausg. März 2018. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). 2018.

VDI 2221 (2018)

VDI 2221: Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung. Ausg. März 2018. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). 2018.

VDI 2221 -1 (2019)

VDI 2221 -1: Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung. Ausg. November 2019. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). 2019.

Vogel et al. (2018)

Vogel, S.; Martin, G.; Schirra, T.; Kirchner, E.: Robust Design for Mechatronic Machine Elements - How Robust Design Enables the Application of Mechatronic Shaft-Hub Connection. In: DESIGN2018. 15th International Design Conference. 2018, S. 3033-3040. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0203>.

Vogel et al. (2019)

Vogel, S.; Vorwerk-Handing, G.; Kirchner, E.: Analysemodell für die Priorisierung von Weiterentwicklungsoptionen zur Sensorintegration. In: DFX 2019: Proceedings of the 30th Symposium Design for X, 18-19 September 2019, Jesteburg, Germany. 30th Symposium Design for X. 2019.
<https://doi.org/10.35199/dfx2019.26>.

Vogel, Kirchner (2019)

Vogel, S.; Kirchner, E.: Simple Integration of Sensory Functions. In: Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design, 1 (1). 2019, S. 3711-3720.
<https://doi.org/10.1017/dsi.2019.378>.

Vorwerk-Handing et al. (2018)

Vorwerk-Handing, G.; Martin, G.; Kirchner, E.: Integration of Measurement Functions in Existing Systems. In: Ekströmer, P.; Schütte, S.; Ölvander, J. (Hrsg.): Proceedings of NordDesign 2018, Linköping, Sweden, 14th - 17th August 2018. 2018.

Vorwerk-Handing et al. (2020)

Vorwerk-Handing, G.; Gwosch, T.; Schork, S.; Kirchner, E.; Matthiesen, S.: Classification and examples of next generation machine elements. In: Forschung im Ingenieurwesen, 84 (1). 2020, S. 21-32.
<https://doi.org/10.1007/S10010-019-00382-1>.

Wäldele (2012)

Wäldele, M.: Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte. Ein Beitrag für die konventionelle und algorithmen-basierte Produktentwicklung. Als Ms. gedr. Berichte aus dem Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt, Nr. 414. Düsseldorf: VDI-Verl. 2012.

Weber (2012)

Weber, C.: Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X. Beiträge zum 23. DfX-Symposium Oktober 2012. Hamburg: TuTech-Verl. 2012, S. 25-26.

Wilcoxon (1945)

Wilcoxon, F.: Individual Comparisons by Ranking Methods. In: Biometrics Bulletin, 1 (6). 1945, S. 80-83.

Würtenberger (2018)

Würtenberger, J.: Ein Beitrag zur Identifikation und Beherrschung von Unsicherheit bei der Modellierung technischer Systeme. 2018. Technische Universität Darmstadt. Dissertation.

Eigene Veröffentlichungen

2017

Vogel, S. and Kirchner, E. (2017), “Konstruieren mit Smart Machine Elements - Einfluss von Bauteiltoleranzen und Uneindeutigkeit”, in Krause, D., Paetzold, K. and Wart-zack, S. (Eds.), Design for X: Beiträge zum 28. DfX-Symposium, Oktober 2017, 1. Auflage, Tutech Verlag, TuTech Innovation GmbH, Hamburg, Hamburg, pp. 311–323.

2018

Vogel, S., Martin, G., Schirra, T. and Kirchner, E. (2018), “Robust Design for Mechatronic Machine Elements – How Robust Design Enables the Application of Mechatronic Shaft-Hub-Connection”, in DESIGN2018, May, 21-24, 2018, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia; The Design So-ciety, Glasgow, UK, pp. 3033–3040. DOI: 10.21278/idc.2018.0203.

Martin, G., Schork, S., Vogel, S. and Kirchner, E. (2018), “MME - Potentiale mikroinvasiver intelligenter Maschinenelemente”, Konstruktion, Vol. 2018 No. 01-02, pp. 71–82.

Schirra, T.; Martin, G.; Vogel, S.; Kirchner, E. (2018), „Ball bearings as sensors for system-atical combination of load and failure monitoring.” In DESIGN2018, May, 21-24, 2018, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Za-greb, Croatia; The Design Society, Glasgow, UK, pp. 3011-3022. DOI: 10.21278/idc.2018.0306

Martin, G., Vogel, S., Schirra, T., Vorwerk-Handing, G., Kirchner, E. (2018), “Methodical Evaluation of Sensor Positions for Condition Monitoring of Gears.” in: Proceedings of NordDesign 2018, Linköping, 14.-17.08.2018,

Kirchner, E., Martin, G., Vogel, S. (2018), „Sensor Integrating Machine Elements – Key to In-Situ Measurements in Mechanical Engineering.” in: Anais do 23. Seminário Internacional de Alta Tecnologia, Piracicaba, Brasilien, In: 23rd International Seminar on High Technology, Piracicaba, Brasilien, 4.10.2018, S. 37-49

2019

Vogel, S. and Kirchner, E. (2019), “Simple Integration of Sensory Functions”, Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design, Vol. 1 No. 1, pp. 3711–3720. DOI: 10.1017/dsi.2019.378.

Vogel, S., Vorwerk-Handing, G. and Kirchner, E., “Analysemodell für die Priorisierung von Weiterentwicklungsoptionen zur Sensorintegration”. DOI: 10.35199/dfx2019.26.

Vorwerk-Handing, G., Vogel, S., Kirchner, E. (2019), „Integration von Messfunktionen in bestehende technische Systeme unter Berücksichtigung der Baustruktur.“ in: Fach-tagung Mechatronik, Paderborn, 27.-28.03.2019, S. 219-224

2020

- Schork, S., Vorwerk-Handing, G., Vogel, S., Kirchner, E. (2020), „Mechatronic Machine Elements – Approach to Develop Prototypes Based on the Signal Flow.” in: Proceedings of TMCE 2020, Delft, Delft University of Technology and in: Tools and Methods of Competitive Engineering, Dublin, Ireland, 11-15 May, 2020, S. 583-594,
- Reichwein, J., Vogel, S., Schork, S., Kirchner, E. (2020), „On the Applicability of Agile Development Methods to Design for Additive Manufacturing.” in: Procedia CIRP Volume 91, pp.: 653-658. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.112

Betreute studentische Arbeiten

2016

Memmesheimer, Jens; Mowa, Rostand; Palm, Lucas; Weitz, Julian; Youn, Him-Tschan: Untersuchung der Gemeinsamkeiten von Maschinenelementen in Bezug auf sensorische Funktionserweiterung. Advanced Research Project, 2016

2017

Altin, Hamdi: Entwicklung eines Prüfstandes zur Untersuchung von selbstfurchenden Schraubenverbindungen. Bachelor-Thesis, 2017

Olbrich, Jonas: Ermittlung der Versagensgrenzen einer additiv gefertigten Schraubenfeder mit integrierter Hohlkammer. Bachelor-Thesis, 2017

Üstündağ, Kubilay: Analyse von Übertragungselementen in und aus rotierenden Systemen. Diplomarbeit, 2017

Reichwein, Jannik Holm: Simulation des Montagevorgangs selbstfurchender Schrauben. Master-Thesis, 2017

2018

Jung, Julias Michael: Thema: Untersuchung des Einflusses der Detailgeometrie auf die Kopfreibung einer Sechskantschraube mit Flansch. Bachelor-Thesis, 2018

Klauer, Vanessa Viktoria: Ermittlung der Kraftaufteilung verspannter Welle-Nabe-Verbindung mittels FEM. Bachelor-Thesis, 2018

2019

Gaß, Lukas; Hennemann, Alexander; Reintke, Maximilian; Schneider, Marlene: Konzept Entwicklung für eine drehmomentmessenden Bremse. Advanced Design Project, 2019

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Sven Vogel
Geburtsdatum: 16.08.1988
Geburtsort: Offenbach am Main
Nationalität: Deutsch

Ausbildung und beruflicher Werdegang

06/2008 Abitur, Theo-Koch-Schule, Grünberg
10/2008 – 01/2016 Studium Mechanical and Process Engineering an der Technischen Universität Darmstadt, Abschluss M. Sc.
09/2013 – 02/2014 Studium Mechanical and Process Engineering an der Universidad de Cantabria in Santander.
03/2016 – 04/2016 Wissenschaftliche Hilfskraft am Fachgebiet Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt.
05/2016 – 10/2020 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der Technischen Universität Darmstadt.